Jean Lemale

LES POMPES À CHALEUR

2e édition

Copyright © 2014 Dunod.

DUNOD

Photo de couverture : © rigamondis – Fotolia.com

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1er juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, Paris, 2012, 2014
ISBN 978-2-10-071339-4

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Copyright © 2014 Dunod.

Table des matières

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

Copyright © 2014 Dunod.

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

Copyright © 2014 Dunod.

ANNEXES

Copyright © 2014 Dunod.

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

Copyright © 2014 Dunod.

1 Historique – contexte

La pompe à chaleur est fondée sur les principes de la thermodynamique découverts au cours du XIXe siècle, que l'on doit aux travaux des scientifiques : Joule, Carnot et Lord Kelvin.



Figure 1.1 – Sadi Carnot (1796-1832)

Sadi Carnot est considéré comme le père de la **thermodynamique** moderne en introduisant le deuxième principe de la thermodynamique.

Copyright © 2014 Dunod.

Les premières pompes à chaleur apparaissent au début du XXe siècle sous forme de machines frigorifiques à compression de fluide.

C'est surtout à partir de 1950 que se développent, en particulier aux États-Unis, les appareils de climatisation à la fois dans l'automobile, le bâtiment et pour certaines applications industrielles.

En France, les années 1950 sont marquées par l'équipement de la quasi-totalité des ménages de machines frigorifiques que sont nos réfrigérateurs, symboles du confort moderne pour l'hygiène alimentaire. Le réfrigérateur puise les calories dans sa propre enceinte pour y abaisser la température et rejette la chaleur puisée dans la pièce où il se trouve. À l'inverse, la pompe à chaleur puise des calories à l'extérieur et les restitue à l'intérieur de l'enceinte à chauffer.

La réversibilité des machines frigorifiques trouve des applications dans le secteur tertiaire. En 1963, lors de la construction de la maison de la Radio, une pompe à chaleur utilisant comme fluide frigorigène l'ammoniac est mise en place pour assurer à la fois les besoins de froid et de chaud de l'immeuble. Elle puise ses calories dans une nappe à 500 m de profondeur à une température de 27 °C.

Dans le secteur domestique, le développement des pompes à chaleur, en substitution ou complément des systèmes de chauffage traditionnels, est impulsé par les chocs pétroliers de 1973 et 1979. En 1980, le programme PERCHE (Pompes à chaleur en relève de chaudières existantes) est lancé sous l'égide d'EDF.

La pompe à chaleur prend le relais de la chaudière existante au fioul lorsque les conditions extérieures imposent l'arrêt de la pompe. Le marché appuyé par une publicité particulièrement incitative connaît un emballement qui sera de courte durée.

En effet, le marché est rapidement victime d'un certain nombre de dysfonctionnements liés au manque à la fois de fiabilité des matériels et de formation des installateurs.

Au cours des années 1990, le faible coût des énergies n'incite pas au développement de cette filière énergétique tant dans le secteur domestique que dans celui du tertiaire. Un redémarrage s'amorce au début des années 2000 avec l'apparition de matériels performants et de nouvelles technologies (capteurs enterrés). La pompe à chaleur est reconnue comme un vecteur de développement des énergies renouvelables. Les professionnels s'organisent avec la création en 2002 de l'AFPAC (Association française pour les pompes à chaleur), la création du label NFPAC et du qualificatif QUALIPAC pour les installateurs. Le crédit d'impôt pour les particuliers et le fonds chaleur pour les projets plus importants complètent le dispositif qui font de la pompe à chaleur une filière incontournable pour atteindre les objectifs définis dans le cadre du Grenelle de l'environnement.

Le Grenelle de l'environnement fixe des objectifs ambitieux pour les pompes à chaleur, environ 2 millions de résidences principales équipées en 2020. Pour les pompes à chaleur géothermiques, l'objectif est d'atteindre un parc de plus de **600 000 installations** d'ici à 2020.

Copyright © 2014 Dunod.

Aujourd'hui, la pompe à chaleur est considérée comme l'un des moyens les plus économiques et écologiques pour assurer les besoins énergétiques de chauffage et de climatisation applicables aussi bien à la rénovation qu'aux constructions neuves pour l'ensemble des secteurs du bâtiment. Les différentes technologies actuellement disponibles sur le marché s'adaptent dans des conditions satisfaisantes aux nouvelles réglementations thermiques.

Les pompes à chaleur avec COP élevé seront susceptibles de répondre aux exigences de la RT 2012 (voir les principaux éléments de la réglementation thermique (RT 2012) en annexe 1). C'est notamment le cas des PAC géothermiques et des chauffe-eau thermodynamiques pour l'eau chaude sanitaire. À noter que la part de l'ECS sera le premier poste de consommation pour ces nouvelles constructions.

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

Copyright © 2014 Dunod.

2 Généralités sur les pompes à chaleur

Pour satisfaire des besoins de chaleur, le premier réflexe est généralement d'utiliser la combustion de matières premières (pétrole, gaz, charbon, bois…). La combustion, outre le fait qu'elle contribue à l'épuisement de ressources limitées, s'effectue à une température élevée alors que la chaleur produite n'est en fait utilisée le plus souvent qu'à une température beaucoup plus basse.

La thermodynamique offre des possibilités pour satisfaire de manière rationnelle des besoins de chaleur à niveau modéré. La nature offre des quantités de chaleur considérables disponibles, souvent à des niveaux de température trop bas pour pouvoir être utilisés directement.

La pompe à chaleur, en appliquant les principes de la thermodynamique, va permettre de relever le niveau de température de ces ressources naturelles pour les rendre utilisables dans de nombreuses utilisations de la vie courante et en particulier, pour le chauffage des bâtiments.

Rappelons que les machines frigorifiques fonctionnent sur le même principe que les pompes à chaleur, mais l'effet recherché est différent.

Aujourd'hui se développent des machines thermodynamiques dont la finalité est de produire du chaud ou « réversibles », c'est-à-dire susceptibles d'assurer les deux fonctions chauffage et refroidissement.

Copyright © 2014 Dunod.

2.1 Principes thermodynamiques

2.1.1 Premier principe

Le premier principe de la thermodynamique stipule que lors de toute transformation, il y a conservation de l'énergie.

Dans le cas des systèmes thermodynamiques fermés (*figure 2.1*), il s'énonce de la manière suivante :

« Au cours d'une transformation quelconque d'un système fermé, la variation de son énergie est égale à la quantité d'énergie échangée avec le milieu extérieur, sous forme de chaleur (Q) et sous forme de travail (W). »

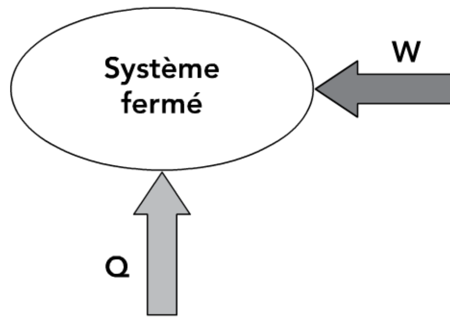


Figure 2.1 – Principe thermodynamique fermé

Dans un système cohérent d'unités, ce premier principe se traduit par la relation : **W + Q = 0**

2.1.2 Deuxième principe

Le premier principe met en évidence la conservation des énergies mises en jeu dans un système. Le second principe permet de connaître l'évolution d'un système. En effet, on peut transformer en totalité du travail en chaleur, mais on ne peut pas toujours transformer de la chaleur en travail.

Lorsqu'un système évolue de manière cyclique entre 2 sources de chaleur, on caractérise une source froide à la température T1 et une source chaude à la température T2. Les appellations « source froide » et « source chaude » sont des appellations relatives à un schéma déterminé. La température de la source chaude est toujours supérieure à la source froide.

Deux cas (*figures 2.2 et 2.3*) sont à considérer :

Copyright © 2014 Dunod.

Moteur thermique

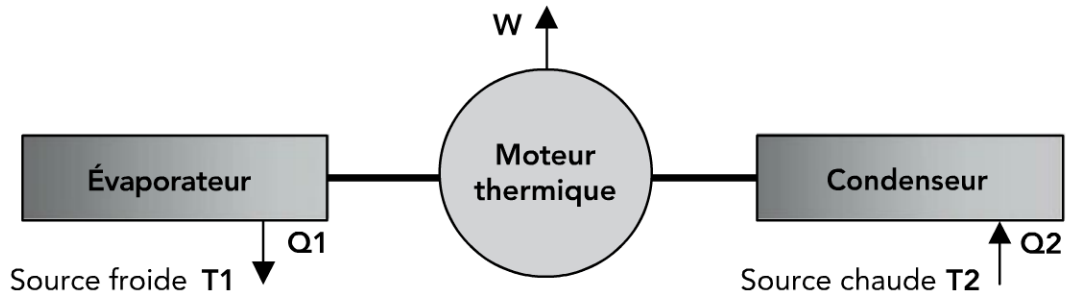


Figure 2.2

Le système reçoit de la chaleur Q2 de la source chaude et en restitue une partie à la source froide Q1 (Q1 < Q2). La différence est transformée en travail W.

En application du premier principe, on peut écrire :

W + Q1 + Q2 = 0 *

*Ce qui est reçu est compté positivement, ce qui est cédé négativement.

Soit en valeur absolue :

W = Q2 – Q1

Pompe à chaleur (transfert de chaleur d'une source froide à une source chaude)

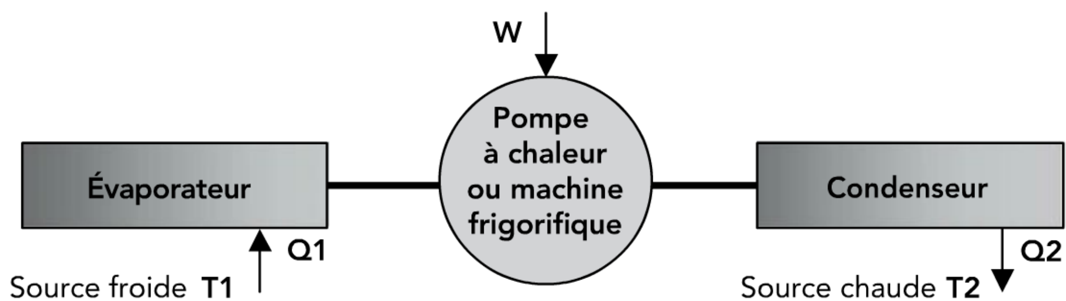


Figure 2.3

Le système reçoit de la chaleur Q1 de la source froide et du travail W. Il restitue de la chaleur Q2 à la source chaude.

En application du premier principe, on peut écrire :

W + Q1 + Q2 = 0 *

*Ce qui est reçu est compté positivement, ce qui est cédé négativement.

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

Soit en valeur absolue :

Q2 = Q1 + W chaleur cédée

Q1 = Q2 – W chaleur prélevée

Le transfert de chaleur d'une source froide vers une source chaude ne se fait pas spontanément, mais avec une compensation représentée par l'énergie apportée au système sous forme mécanique (travail). À noter que les pompes à chaleur utilisant le principe d'absorption remplacent l'énergie mécanique par de l'énergie thermique (*chapitre 4*).

2.2 Applications à la production de chaud et de froid

Les principes thermodynamiques relatifs aux moteurs thermiques ne seront pas développés dans cet ouvrage. Cependant, pour certaines applications, l'énergie mécanique nécessaire au transfert d'énergie peut être fournie par un moteur thermique dont une partie de la chaleur destinée à la source froide pourra être récupérée en mode chauffage (*paragraphe 3.6*).

Le système thermodynamique fonctionnant entre 2 sources peut être utilisé pour satisfaire des besoins de refroidissement, de chauffage ou les deux à la fois.

2.2.1 Machine frigorifique

On ne produit pas du froid à proprement parler. En réalité, on enlève de la chaleur Q1 à la source froide qui est transférée à la source chaude. Il y a donc un abaissement de température à la source froide.

La quantité de chaleur Q2 transférée à la source chaude est supérieure à celle prélevée à la source chaude. Un tel système produit plus de calories que de frigories à utiliser. L'enlèvement de chaleur de la source froide nécessite qu'elle puisse être évacuée au niveau de la source chaude.

2.2.2 Pompe à chaleur

Dans ce cas, on s'intéresse à la chaleur récupérée à partir de la source froide Q1, à laquelle s'ajoute l'énergie mécanique W dégradée en chaleur, nécessaire au système.

Copyright © 2014 Dunod.

2.2.3 Production simultanée de chaud et de froid

Dans ce cas, on utilise à la fois la chaleur reçue à la source chaude et le froid produit à la source froide. Cette application nécessite une configuration où l'on a simultanément besoin de chaud dans un endroit et de froid dans un autre. Cette application est connue sous le terme de thermofrigopompe (*chapitre 3.7*).

2.3 Cycle de Carnot inversé

Le cycle thermodynamique permettant le transfert de chaleur entre 2 sources sous l'effet d'un travail peut être représenté dans un diagramme entropique (*figure 2.4*).

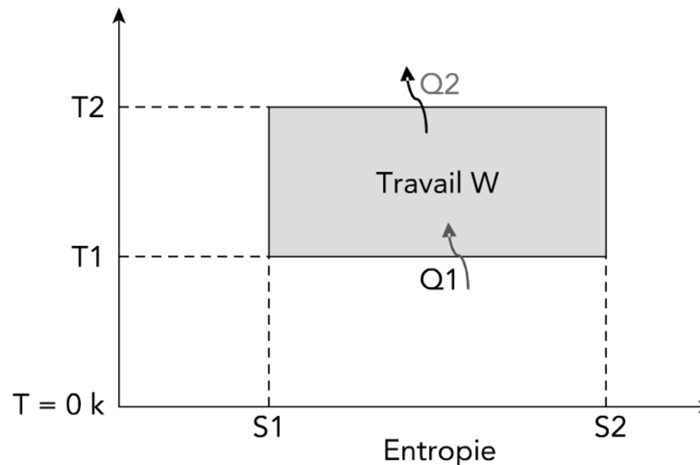


Figure 2.4 – Diagramme entropique

Pour évaluer les performances maximales, on considère un cycle réversible particulier formé de 2 évolutions isothermes et de 2 évolutions isentropiques.

L'utilisation du diagramme entropique permet d'évaluer les énergies mises en jeu aux différents stades de l'évolution. Les énergies sont représentées par les surfaces délimitées par les droites isothermes horizontales et les droites isentropiques.

La chaleur reçue de la source froide :

$$Q1 = T1 \times (S2 - S1)$$

La chaleur fournie à la source chaude :

$$Q2 = T2 \times (S1 - S2)$$

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

Travail dépensé :

$$W = (T2 - T1) \times (S2 - S1)$$

En mode production de chaud, on définit le coefficient de performance de la pompe à chaleur COP comme le rapport entre l'énergie récupérée par l'énergie dépensée :

$$COP = Q2 / W$$

En application du deuxième principe, le COP théorique ou maximal est égal à :

$$COP\ th = T2 / (T2 - T1)$$

ou

$$Q2 / (Q2 - Q1)$$

avec T2 et T1 températures respectives de la source chaude et de la source froide sont exprimées en températures absolues exprimées en Kelvin (K).

En mode production de froid, on définit la performance de la machine frigorifique comme le rapport de l'énergie frigorifique fournie par l'énergie dépensée. Elle est désignée sous les termes de coefficient de performance frigorifique Cfr ou EER *Energy Efficiency Ratio* :

$$EER = Q1 / W$$

En application du deuxième principe, l'EER ou Cfr théorique ou maximal est égal à :

$$T1 / (T2 - T1) \text{ ou } Q1 / (Q2 - Q1)$$

En mode de production de chaud et de froid simultanés, le coefficient de performance global idéal est égal à :

$$(T2 + T1) / (T2 - T1)$$

Dans la réalité, les performances des systèmes thermodynamiques sont inférieures aux valeurs théoriques définies par les formules ci-dessus. En effet, le cycle idéal n'est pas réalisable dans la mesure où les fluides utilisés dans les machines thermodynamiques ne sont pas parfaits et qu'il faut tenir compte des différentes pertes et échanges avec l'extérieur.

Les coefficients de performance réels se situent entre 40 et 60 % des valeurs théoriques.

Copyright © 2014 Dunod.

L'examen des résultats issus du deuxième principe de Carnot met en évidence le caractère essentiel des conditions de fonctionnement des pompes à chaleur, à savoir l'écart entre les températures des 2 sources entre lesquelles évoluent les systèmes : T2 et T1. Le *tableau 2.1* met en évidence l'évolution du COP et de l'EER en fonction des écarts de température des sources.

Tableau 2.1

Température source froide T1	– 10	0	10	5
Température source chaude T2	60	50	35	35
COP théorique	4,8	6,5	12,3	10,3
EER théorique	3,8	5,5	11,3	9,3
COP global théorique	8,5	11,9	23,6	19,5
COP réel (ordre de grandeur)	2,4	3,2	6,2	5,1

Il faut noter que l'EER est toujours inférieur au COP (T1 et T2 identiques).

2.4 Familles de pompes à chaleur

Il existe sur le marché deux grandes familles de pompes à chaleur : les pompes à chaleur à compression et les pompes à chaleur à absorption (voir chapitre 4). Le chapitre suivant concerne uniquement la pompe à chaleur à compression représentant la quasi-totalité du marché en France.

Il faut néanmoins noter d'autres types de pompes à chaleur qui n'ont pas à ce jour connu un développement significatif ou qui sont encore au stade de la recherche développement :

• *Pompes à chaleur à effet Peltier*

Il s'agit d'un module thermoélectrique constitué d'un assemblage d'éléments semi-conducteurs, entre deux semelles conductrices de chaleur. La circulation d'un courant continu fait apparaître une « face froide », qui absorbe des calories, et une face « chaude », qui dégage des calories. Le système est réversible et selon le sens du courant parcourant la pile, il y a production de chaud ou de froid. Ce phénomène a été mis en évidence en 1834 par le physicien français Peltier. Ces PAC sont surtout utilisées pour du refroidissement (petits réfrigérateurs de camping) ou pour des usages très spécifiques : refroidissement des

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

composants de vaisseaux spatiaux, refroidissement de plaques de microscopes Les puissances mises en œuvre sont faibles (inférieures à 200 W).

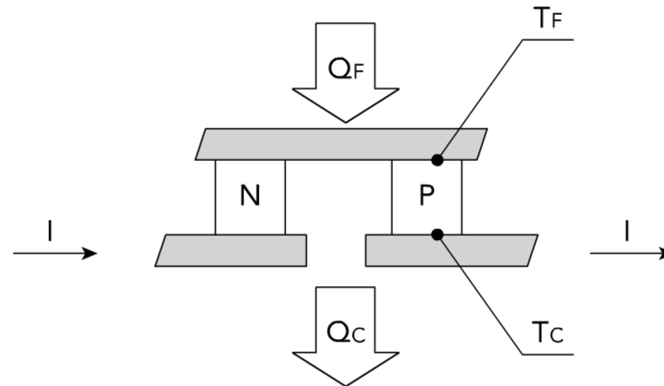


Figure 2.5 – Schéma de principe de l'effet Peltier

• Pompe à chaleur à éjection de vapeur

Le fluide utilisé est uniquement de l'eau, l'énergie extérieure est apportée au système par une chaudière à vapeur. La vapeur est injectée dans un éjecto-compresseur qui abaisse la pression côté évaporateur et joue le rôle du compresseur avant condenseur.

Ce type de pompe à chaleur est réservé aux grandes puissances.

• Pompe à chaleur Vuilleumier *(double moteur Stirling)*

La machine de Vuilleumier associe deux cycles de Stirling (moteur à combustion externe), l'un moteur et l'autre récepteur.

Le gaz de travail est soit de l'hélium, soit de l'azote. On rencontre des applications dans le domaine industriel notamment pour la production de froid négatif. Le COP machine est de l'ordre de 60 % du COP théorique.

• Pompe à chaleur magnétocalorique

L'effet magnétocalorique est une propriété intrinsèque des matériaux magnétiques qui consiste à absorber ou à émettre de la chaleur sous l'action d'un champ magnétique. Cela se traduit par un réchauffement ou un refroidissement du matériau. Ce système possède une bonne efficacité thermodynamique. Ne comportant pas de compresseur, ce type de pompe à chaleur est particulièrement silencieux.

Copyright © 2014 Dunod.

3 Pompe à chaleur à compression

La pompe à chaleur à compression est constituée d'un circuit fermé et étanche dans lequel circule un fluide frigorigène qui évolue entre l'état liquide et gazeux selon les organes qu'il traverse. Ces organes principaux sont au nombre de 4 : l'évaporateur, le compresseur, le condenseur et le détendeur.

3.1 Principe de fonctionnement

Ce principe (*figure 3.1*) bien connu des industries frigorifiques est appelé cycle frigorifique.

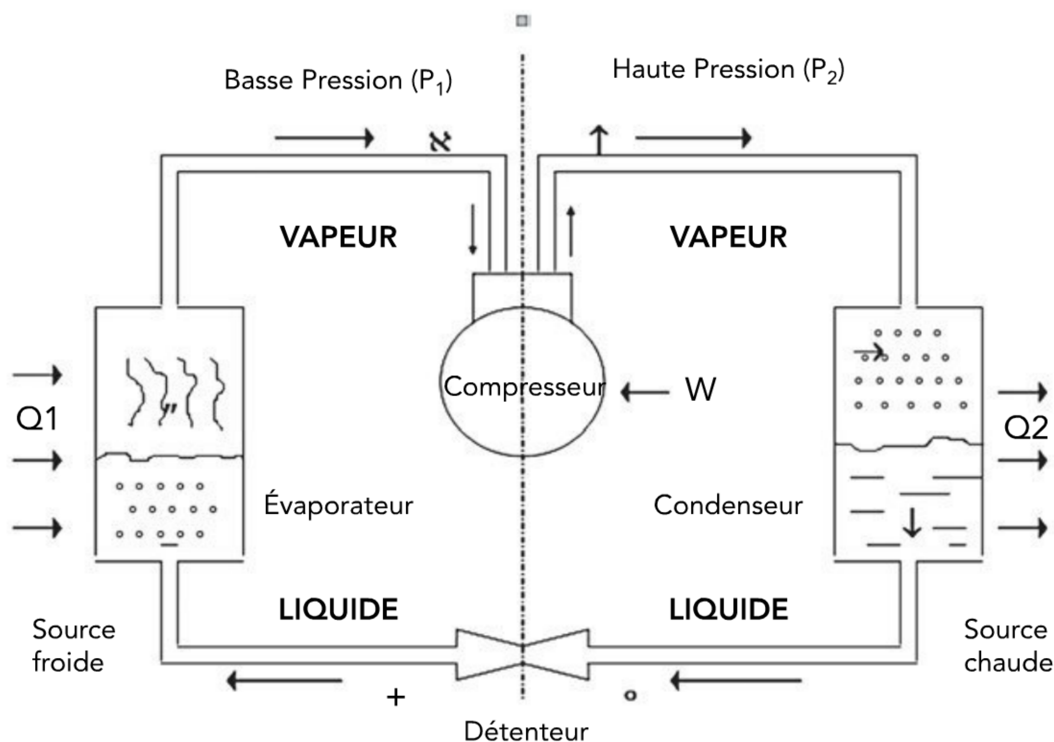


Figure 3.1 – Principe de fonctionnement d'une PAC à compression

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

La chaleur prélevée au niveau de l'environnement (air, sol, eau…) est captée par le fluide caloporteur (à faible point d'ébullition) au niveau de l'évaporateur. Le fluide change d'état et se transforme en vapeur. Le compresseur comprime cette vapeur, augmentant ainsi sa température. C'est au niveau du condenseur que la vapeur surchauffée transmet sa chaleur au milieu à chauffer. Le fluide toujours comprimé redevient liquide en se condensant. Le détendeur réduit la pression du fluide caloporteur. La température de ce dernier s'abaisse fortement le rendant prêt pour une nouvelle absorption de chaleur et le cycle peut recommencer.

3.2 Diagramme de Mollier

Les différentes étapes du cycle thermodynamique d'une PAC à compression peuvent être suivies sur un diagramme, dit de Mollier, qui visualise les changements d'état d'un fluide frigorigène donné en fonction des paramètres de température et de pression. L'abscisse du diagramme (*figure 3.2*) est graduée en enthalpie permettant ainsi de quantifier les échanges d'énergie au sein du système.

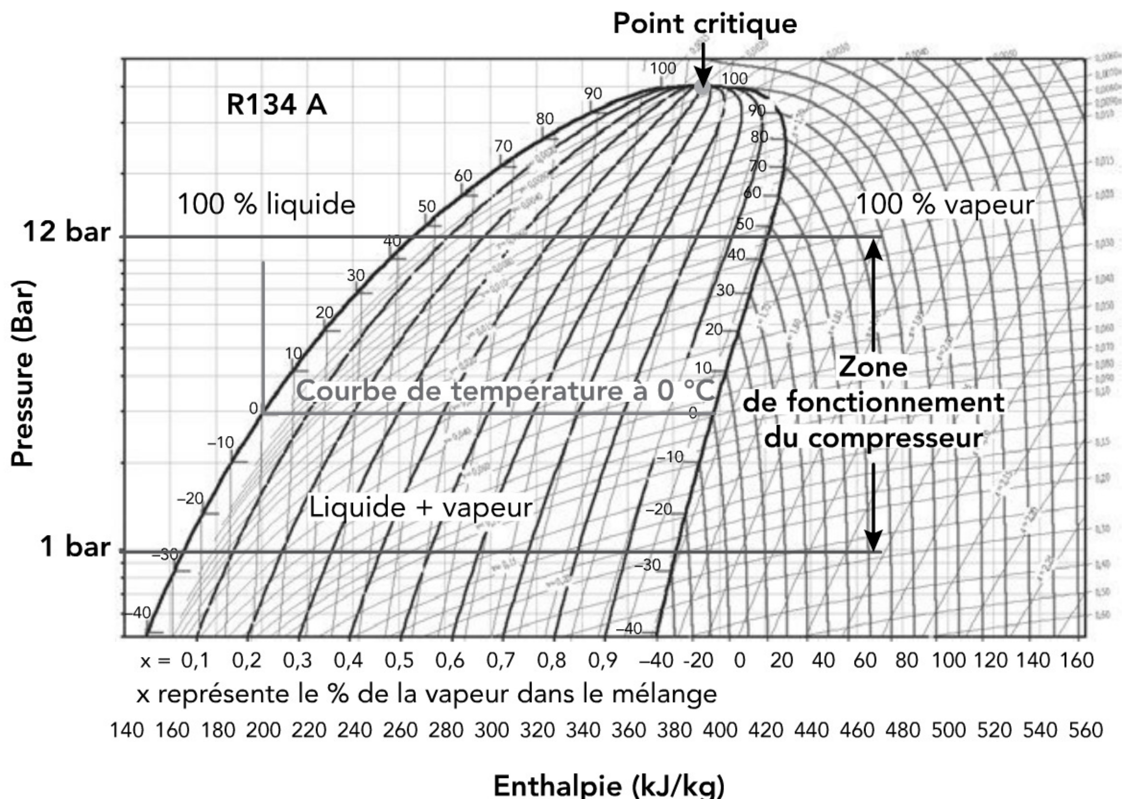


Figure 3.2 – Diagramme de Mollier du fluide frigorigène R134 A

Ce diagramme (enthalpie, Log p) délimite de gauche à droite 3 zones d'état du fluide : une phase 100 % liquide, une phase liquide + vapeur et une phase 100 % vapeur. À l'intérieur de la zone diphasique, le passage de la phase liquide à la

Copyright © 2014 Dunod.

phase gazeuse se fait pour une pression donnée à température constante. De même, le passage de la phase gazeuse à la phase liquide se fait à pression et température constantes à l'intérieur de la zone diphasique. À la partie supérieure de la courbe délimitant les phases liquides et solides se trouve le point critique. On définit la température critique du fluide comme la température limite au-delà de laquelle la liquéfaction n'est plus possible quelle que soit la pression.

Dans le cas du fluide frigorigène R134 A dont le cycle thermodynamique est décrit dans la *figure 3.2*, on note par exemple qu'à une pression de 2 bars constante, le fluide en passant de l'état liquide à l'état gazeux évolue à une température constante (–10 °C) sous l'effet d'un apport d'énergie faisant évoluer l'enthalpie du mélange. Sur ce même diagramme, on note que le passage de l'état gazeux à l'état liquide se fait à 12 bars et 50 °C en cédant de la chaleur (baisse de l'enthalpie). Le point critique est caractérisé par une température de 101 °C et une pression de 40,7 bars.

On peut suivre l'évolution d'un fluide frigorigène au sein d'une pompe à chaleur dans un diagramme de Mollier comme cela est indiqué dans la *figure 3.3*.

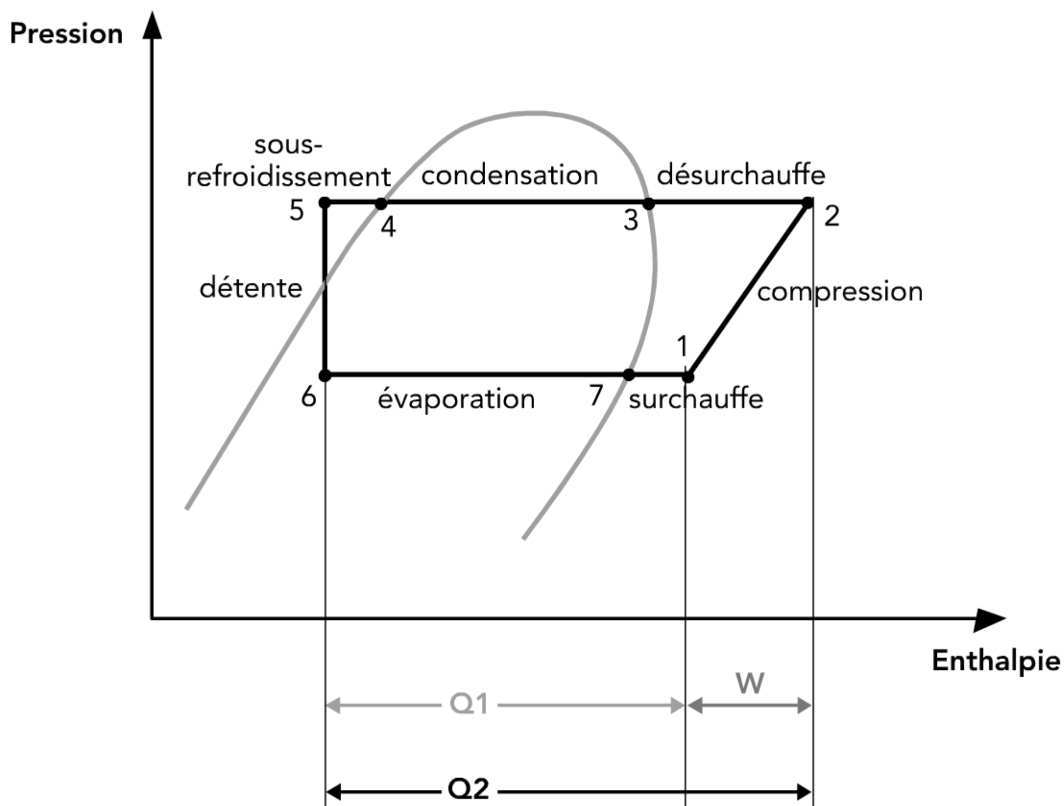


Figure 3.3 – Diagramme de Mollier au sein d'une pompe à chaleur

Étape 1-2 : en 1, le fluide frigorigène est à l'état gazeux, il est comprimé par le compresseur, sa température augmente à un niveau supérieur au milieu à chauffer.

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

Étapes 2-3 ; 3-4 ; 4-5 : cette transformation se fait à pression constante. De 2 à 3, le gaz se refroidit en cédant ses calories à la source chaude (désurchauffe). De 3 à 4, le gaz se condense en cédant sa chaleur latente de condensation ; cette phase se fait à température constante. En 4, le fluide frigorigène est totalement liquide. Un refroidissement du liquide de 4 à 5 est également possible avec abaissement de température (sous-refroidissement).

Étape 5-6 : de 5 à 6, le fluide en passant au travers d'un détendeur abaisse la pression et engendre une baisse brutale de la température et une vaporisation partielle du fluide. Cette transformation se fait sans échange d'énergie (isenthalpique).

Étapes 6-7 ; 7-1 : de 6 à 7, c'est la phase d'évaporation. Au contact de la source froide, le fluide frigorigène s'évapore et capte la chaleur du milieu ou il baigne. En 7, le fluide est totalement gazeux. Avant d'être aspiré par le compresseur, le gaz peut subir une légère surchauffe qui évite que du liquide soit aspiré par le compresseur.

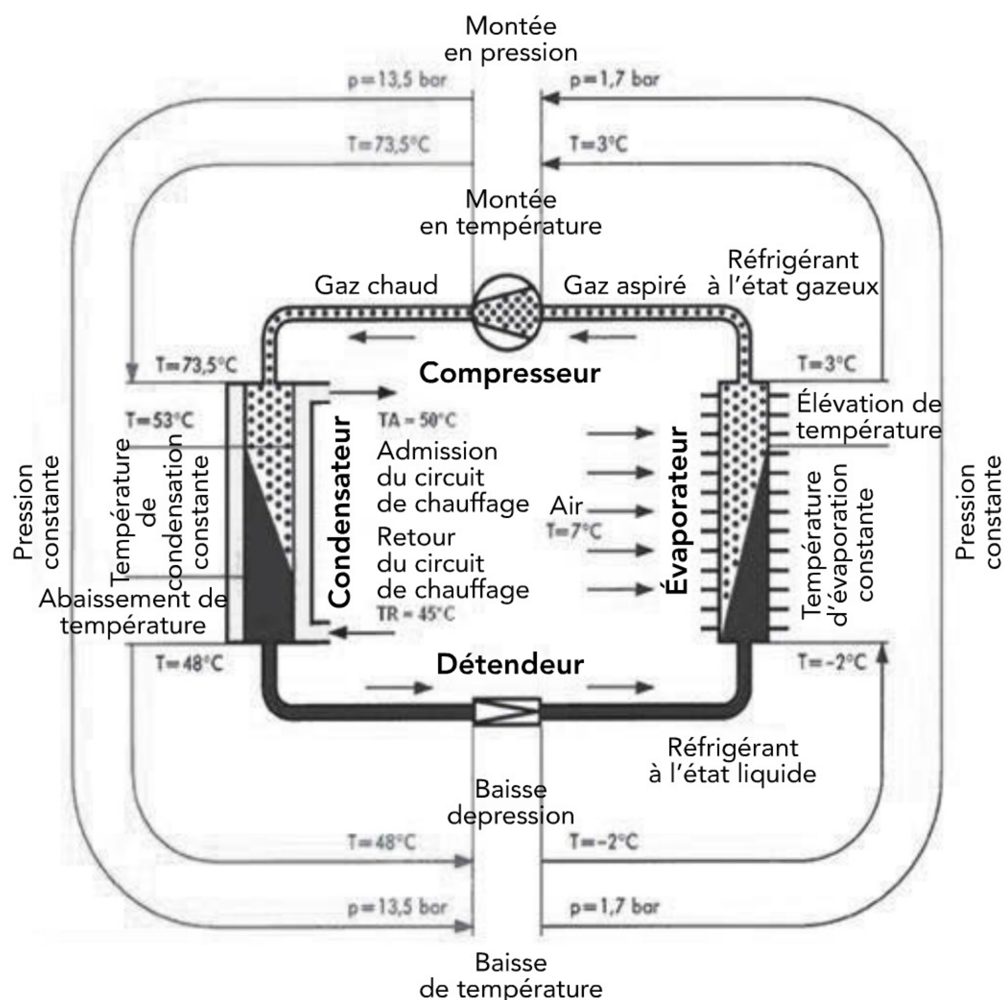


Figure 3.4 – Application à une PAC air-eau utilisant comme fluide frigorigène du R134 A (source Ochsner)

Copyright © 2014 Dunod.

Le diagramme de Mollier permet également de visualiser les paramètres énergétiques évoqués plus haut :

- énergie prélevée : segment 6.1 ;
- énergie récupérée : segment 2.5 ;
- énergie dépensée : segment 1.2 ;
- coefficient de performance : segment 2.5/segment 1.2 ;
- coefficient de réfrigération (EER) : segment 6.1/segment 1.2.

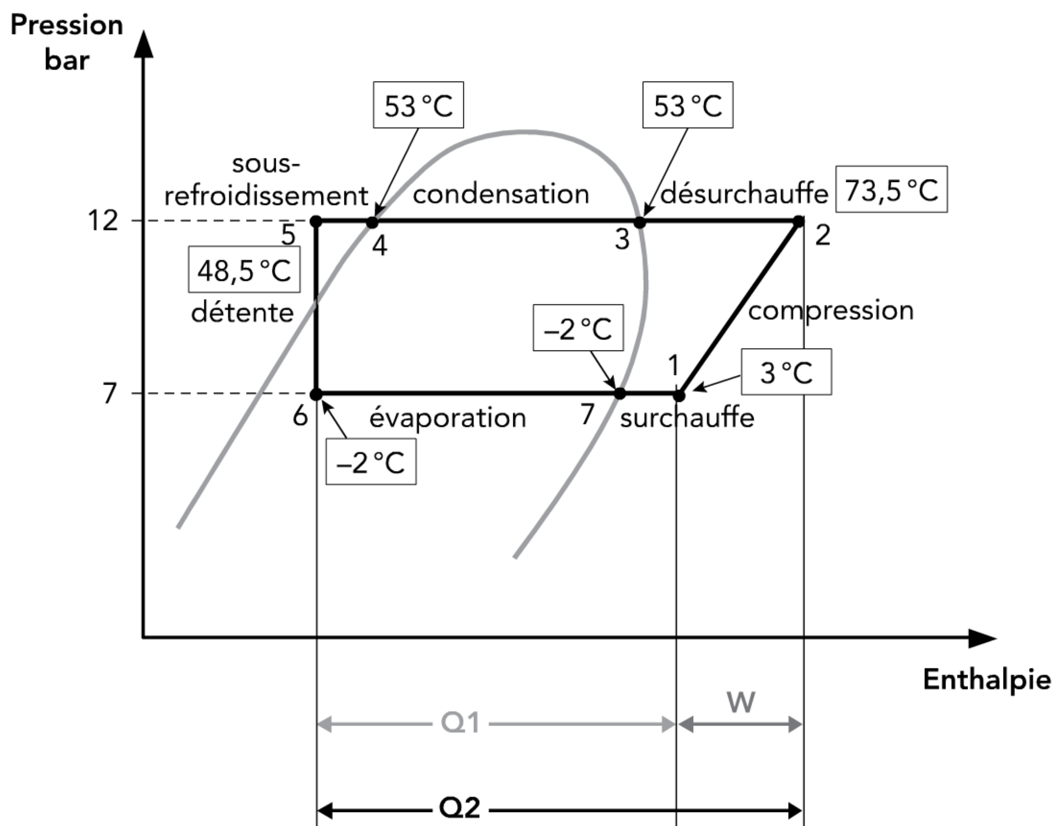


Figure 3.5 – Évolution du fluide frigorigène au cours du cycle thermodynamique (source Ochsner)

3.3 Coefficients de performance

Le coefficient de performance (COP) représente la performance énergétique de la pompe à chaleur fonctionnant en mode chauffage. Il correspond au rapport entre l'énergie utile (chaleur restituée pour le chauffage) et l'énergie consommée pour faire fonctionner la pompe à chaleur. Le COP est mesuré par le fabricant et dépend des caractéristiques d'essais. Il est défini pour le couple de températures

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

correspondant au milieu où la PAC puise les calories et au milieu où la PAC restitue les calories. Dans la pratique, pour une même machine, plus l'écart entre ces températures augmente, plus le COP diminue, et inversement. L'EER ou COP froid est défini comme le rapport entre l'énergie prélevée dans le milieu à refroidir et l'énergie dépensée pou assurer cette fonction.

La Norme EN 14511 spécifie les conditions d'essai pour la détermination des caractéristiques de performances des pompes à chaleur air/air, eau/air, air/eau et eau/eau, avec compresseur entraîné par moteur électrique, lorsqu'ils sont utilisés pour le chauffage des locaux. Pour chacun de ces systèmes, des points d'essais nominaux et d'applications sont définis :

- pour les systèmes air/air et air/eau, l'essai est réalisé pour une température extérieure nominale de +7 °C ;
- pour les systèmes eau/eau, l'essai est réalisé pour une température d'eau nominale de 10 °C ;
- pour les systèmes eau glycolée/eau, l'essai est réalisé pour une température d'eau nominale de 0 °C ;
- pour les systèmes de type sol/sol ou sol/eau, il n'existe pas de norme d'essai mais des protocoles admis par la majorité des industriels. Pour ces produits, la température nominale du fluide à l'entrée de l'évaporateur est de –5 °C.

La Norme susvisée indique une valeur pour un rapport de puissances mesurées dans des conditions très précises. Le coefficient de performance varie non seulement en fonction du type de pompes à chaleur à installer, mais aussi selon les fluctuations saisonnières de la température extérieure. Le COP d'une pompe à chaleur air/eau pourra ainsi passer de 3 à 2 pour une température qui varierait de 7 °C à 0 °C.

Les mesures ne concernent que les éléments rattachés à la pompe à chaleur et sont indépendantes de l'installation de chauffage.

Le *tableau 3.1*, extrait d'une notice constructeur, met en évidence l'influence des températures des sources chaudes et froides.

Dans la réalité et pour l'utilisateur, la performance d'une PAC se mesure dans la durée, à savoir par le rapport entre la quantité d'énergie produite et l'énergie dépensée. Il faut aussi tenir compte des auxiliaires (pompes, ventilateurs, systèmes de dégivrage…) qui, pour certains types de PAC, ont une influence non négligeable sur la performance effective.

Copyright © 2014 Dunod.

Tableau 3.1 – Extrait d'une notice de constructeur (PAC air-eau)

T° eau en mode chaud (mini/maxi)	+ 25 °C/+ 55 °C
T° ext. en mode chaud (mini/maxi)	– 20 °C/ + 35 °C
T° eau en mode froid (mini/maxi)	+ 5 °C/+ 25 °C
T° ext. en mode froid (mini/maxi)	+ 10 °C/ + 43 °C
Puissance nominale en chaud en kW (cf. essais NF PAC) – par A7/W35 – par A-7/W35	 5,30 3,31
– par A7/W45 – par A-7/W45	4,30 2,31
– par A7/W55 – par A-7/W55	5,90 3,92
COP nominal en chaud en kW (cf. essais NF PAC) – par A7/W35 – par A-7/W35	 5,00 2,83
– par A7/W45 – par A-7/W45	3,73 2,31
– par A7/W55 – par A-7/W55	2,76 1,72
Puissance nominale en froid en kW – par A35/W18 – par A35/W7	 5,64 4,14

En dehors du COP figurant sur la notice du constructeur, il existe plusieurs présentations de la performance d'une pompe à chaleur dont les principaux sont définis ci-après.

3.3.1 COP théorique

C'est le COP donné par les lois de la thermodynamique, déjà évoqué au paragraphe 2.3. Le COP théorique se calcule en fonction des températures absolues d'évaporation Te et de condensation Tc du fluide frigorigène :

$$\text{COP théorique du cycle} = Tc / (Tc - Te)$$

Dans la pratique, la PAC ne décrit pas le cycle idéal de Mollier car les hypothèses admises ne sont pas respectées :

- la compression n'est pas isentropique (perte de chaleur) au niveau du compresseur lui-même. Il faut également intégrer son rendement mécanique, le rendement électrique, et le rendement indiqué ;
- la détente n'est pas isenthalpique ;

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

- il y a des pertes de charge au niveau des soupapes d'admission et de refoulement du fluide, ainsi que dans la tuyauterie (~ 0,2 à 0,4 bars) ;
- les échangeurs ne sont pas parfaits.

Dans la pratique, ce COP permet d'évaluer l'incidence des températures des sources sur la performance des sources. Il met également en évidence l'importance de la différence de température entre la source froide et la source chaude.

Généralement, on connaît la température des sources. Les températures de condensation et d'évaporation du fluide frigorigène sont différentes des sources chaude et froide après échange (*tableau 3.2*). On définit alors un COP théorique à partir des températures des sources.

Tableau 3.2

	Évaporateur (air)	Condenseur (eau)	COP
Sources	7 °C	50 °C	**7,5**
Fluide	2 °C	53 °C	**6,4**

3.3.2 COP compresseur

Il est caractérisé par le rapport entre la puissance thermique délivrée au condenseur et la puissance électrique absorbée par le compresseur. Il varie selon le type de compresseur : il est, par exemple, plus élevé pour un compresseur Scroll que pour un compresseur à piston.

3.3.3 COP saisonnier ou global annuel de l'installation

Le coefficient annuel, ou COPA, définit la performance annuelle de l'installation de la pompe à chaleur. Il intègre la consommation des auxiliaires non permanents :

- ventilateurs (exemple : ventilateurs des PAC sur air) ;
- pompes de circulation du fluide caloporteur ;
- résistance de dégivrage pour certaines PAC sur air extérieur.

Sa valeur est déterminée à partir des consommations mesurées sur une saison de chauffe ou sur une année s'il y a fourniture de chaleur pour l'ECS ou une piscine.

$$\text{COPA} = \frac{\text{Énergie thermique restituée sur une saison de chauffe}}{\text{Énergie consommée par l'installation (PAC + auxiliaires)}}$$

Copyright © 2014 Dunod.

C'est l'indice le plus important dans l'examen d'une installation de pompe à chaleur. Il est établi à partir d'un bilan énergétique sur une année de fonctionnement en quantifiant l'énergie produite et l'énergie dépensée pour faire fonctionner l'installation. C'est le coefficient de performance annuel qui donne vraiment une idée du « rendement » et de l'efficacité de l'installation.

Pour les équipements dont la puissance est inférieure à 12 kW, les fabricants doivent désormais mentionner les coefficients saisonniers. Cette disposition concerne les climatiseurs ou pompes à chaleur air/air dont la puissance frigorifique nominale (ou la puissance calorifique si l'appareil ne fonctionne pas en mode froid) est inférieure ou égale à 12 kW, conformément au règlement UE N° 206/2012 du 6 mars 2012 (disposition applicable depuis le 1/12/2013).

Deux coefficients de performance saisonniers ont été définis :

- **SEER**, coefficient d'efficacité énergétique saisonnier pour le mode refroidissement ;
- **SCOP**, coefficient de performance saisonnier pour le mode chauffage.

Pour ces équipements, ils remplacent les coefficients EER et COP.

Ces coefficients de performance saisonniers donneront une information plus juste sur l'efficacité énergétique réelle des systèmes de climatisation et des pompes à chaleur.

3.4 Éléments constitutifs d'une PAC à compression

Le circuit d'une pompe à chaleur à compression est constitué des éléments principaux suivants : compresseur, condenseur, évaporateur, détendeur, circuit de fluide frigorigène.

3.4.1 Compresseurs

Il constitue l'organe essentiel de la pompe à chaleur. Par ailleurs, son rendement aura un impact déterminant sur le coefficient de performance de la pompe à chaleur.

On distingue généralement 2 catégories de compresseurs : les compresseurs volumétriques et les compresseurs centrifuges. Les technologies utilisées dépendent de la puissance nécessaire. Pour les **petites puissances**, on utilise des

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

compresseurs à piston, mais ils sont de plus en plus remplacés par 2 types de compresseurs plus performants de type Scroll ou Twin rotary.

Compresseurs volumétriques à piston

Dans les **compresseurs à piston,** le moteur entraîne un vilebrequin ou un excentrique qui imprime un mouvement alternatif à un ou plusieurs pistons (comme dans un moteur thermique classique). Les cylindres sont équipés de clapets d'aspiration et de refoulement.

Le fonctionnement de ce type de compresseur doit prévoir un dispositif évitant l'arrivée du fluide frigorigène sous forme liquide dans le cylindre qui endommagerait les clapets. En général, un ressort puissant est installé sur le chapeau de cylindre qui se soulève en cas d'arrivée du liquide.

Ce type de compresseur présente une gamme de puissance très large.

Les compresseurs volumétriques sont de plusieurs types. Cela dépend s'ils sont fermés (hermétiques), semi-hermétiques, ou ouverts, au niveau de l'association entre le moteur et le compresseur.

Dans les **compresseurs hermétiques**, le moteur électrique et le compresseur sont logés dans une même enveloppe. Les éléments ne sont pas accessibles. Ce type de compresseur est utilisé pour de faibles puissances, de 1 à 15 kW. Outre son faible encombrement, l'avantage de ce système est la possibilité de récupérer au condenseur de l'énergie thermique dissipée par le moteur.

Dans les **compresseurs semi-hermétiques,** le moteur est accolé au compresseur, ces éléments sont accessibles pour des opérations de maintenance. Le moteur peut comporter plusieurs cylindres montés en ligne, en V ou en étoile. La puissance des compresseurs peut atteindre 75 kW.

Dans les **compresseurs ouverts**, le compresseur est accouplé au moteur soit simplement en bout d'arbre par un manchon d'accouplement, ou bien à l'aide de poulies et courroies. Ils peuvent comporter jusqu'à 16 cylindres. L'entraînement du compresseur peut également être assuré par un moteur thermique, voire une turbine à gaz ou à vapeur.

Compresseur Scroll

Le compresseur Scroll (compresseur à spirales sans piston ni clapet) présente un très bon rendement. Son apparition sur le marché est relativement récente, il est de plus en plus utilisé dans les pompes à chaleur de petites puissances.

Copyright © 2014 Dunod.

Le compresseur Scroll (*figure 3.6*) comprime les vapeurs du fluide frigorigène par rotation d'une partie mobile autour d'un élément fixe en forme de spirale. Les 2 spirales sont déphasées de 180°. Dans leur rotation, elles forment plusieurs volumes qui se créent à l'aspiration, se réduisent progressivement au fur et à mesure du déplacement orbital de la spirale mobile pour déboucher vers l'orifice de refoulement central.

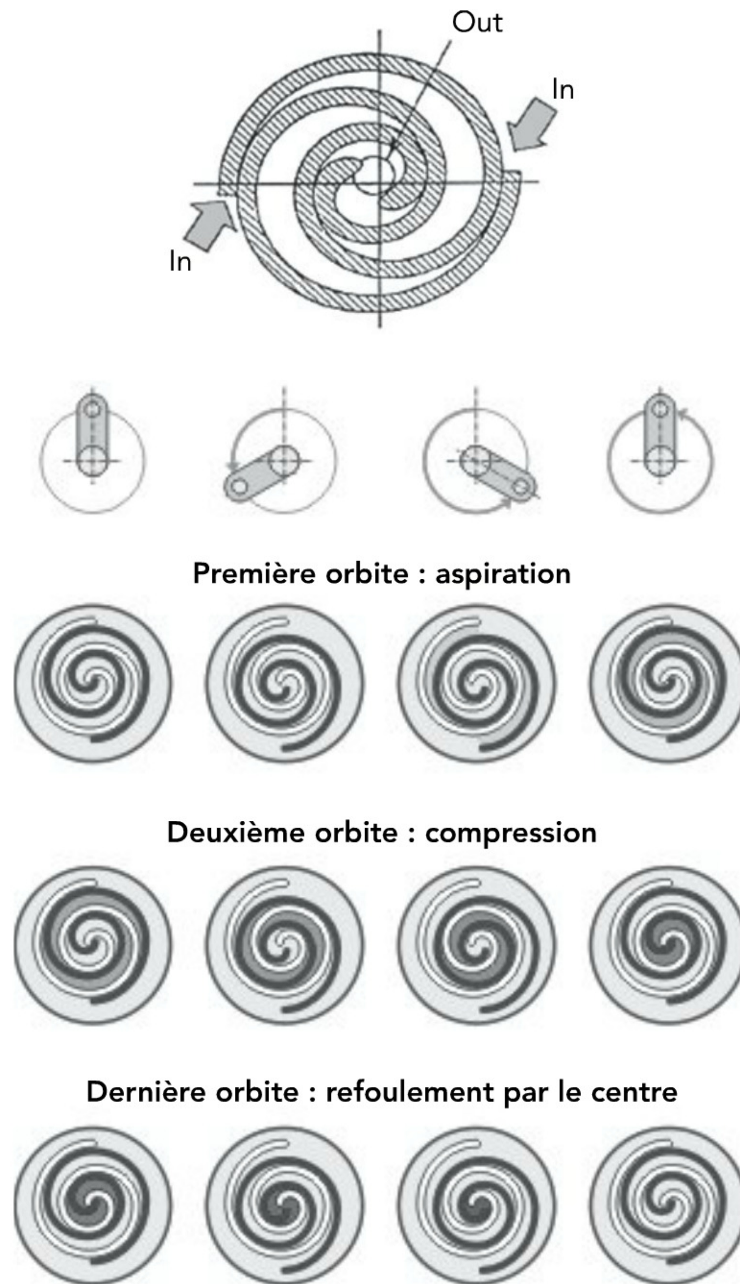


Figure 3.6 – Compresseurs Scroll

Ce type de compresseur peut être équipé d'une connexion à injection de vapeur. Une partie du liquide après le condenseur passe au travers d'un détendeur annexe et d'un échangeur à plaques, le liquide du circuit principal est ainsi refroidi, ce

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

qui permet au taux de compression et à la puissance thermique de s'accroître. L'augmentation de température permet de s'adapter au marché de la rénovation. Ce procédé est désigné sous le nom de cycle EVI (*Enhanced Vapour Injection*).

Sa gamme de puissances va de 2 à 60 kW, mais il est toujours possible de mettre plusieurs compresseurs en parallèle.

Le compresseur DC Twin Rotary (*figure 3.7*) apparu plus récemment sur le marché est composé de 2 chambres de compression fixes. Un galet excentré est chargé de comprimer le fluide dans chaque chambre. Les 2 galets sont fixés sur le même axe et sont diamétralement opposés. Ce compresseur offre des performances intéressantes.

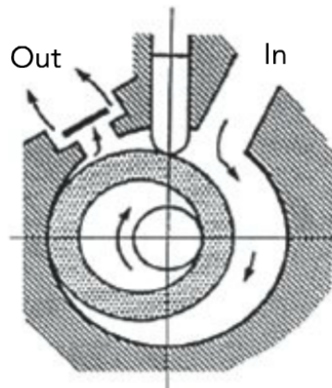


Figure 3.7 – Compresseur Twin Rotary

Compresseurs volumétriques à vis

Ces compresseurs sont utilisés pour de fortes puissances (300 à 5 000 kW au condenseur).

Ils sont composés d'une vis hélicoïdale (mono-rotor) ou de 2 vis (bi-rotor). Ces compresseurs ont un très bon rendement à pleine charge et nécessitent peu de maintenance.

Ces compresseurs (*figure 3.8*) permettent un taux de compression élevé et autorisent une régulation en puissance de 10 à 100 %.



Figure 3.8 – Compresseur à vis bi-rotor

Copyright © 2014 Dunod.

Compresseur centrifuge

Un compresseur centrifuge (*figure 3.9*) est constitué d'un rotor muni d'une ou plusieurs roues à aubages entraînées à grande vitesse. L'énergie mécanique est transformée en énergie cinétique puis en pression au travers d'un diffuseur. La variation de puissance s'obtient par variation des ailettes de 20 à 100 %. Les gammes de puissances offertes sont en général supérieures à 1 000 kW ce qui le destine aux grosses installations. Dans le cas de compresseurs ouverts, l'entraînement peut être assuré par des machines thermiques (moteurs ou turbines).



Figure 3.9 – Compresseur centrifuge

3.4.2 Entraînement du compresseur

Généralement, le compresseur est entraîné par un moteur électrique. Il peut, dans certains cas, être entraîné par un moteur thermique, et donc offrir la possibilité de récupérer de la chaleur sur les gaz d'échappement et sur l'eau de refroidissement du moteur.

Moteur électrique

Pour les pompes à chaleur dont le compresseur est entraîné par un moteur électrique, la variation électronique de vitesse permet une amélioration notable des performances. La modulation de puissance peut se faire entre 20 et 120 % de la valeur nominale.

La technologie Inverter, qui tend à se généraliser, consiste à pouvoir moduler la vitesse de rotation du compresseur pour l'adapter aux besoins de puissance. Cette technologie est bien adaptée au compresseur rotatif et de type Scroll.

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

Il existe 2 types d'Inverter : l'un alimenté en courant alternatif (compresseur AC), l'autre alimenté en courant continu (compresseur DC).

L'adaptation de la puissance en fonction des besoins permet d'une part, une meilleure efficacité énergétique et d'autre part, une amélioration du confort.

L'installation d'une PAC peut entraîner une modification de la puissance électrique souscrite ou un changement de branchement qui, de monophasé, devrait devenir triphasé.

Moteur thermique

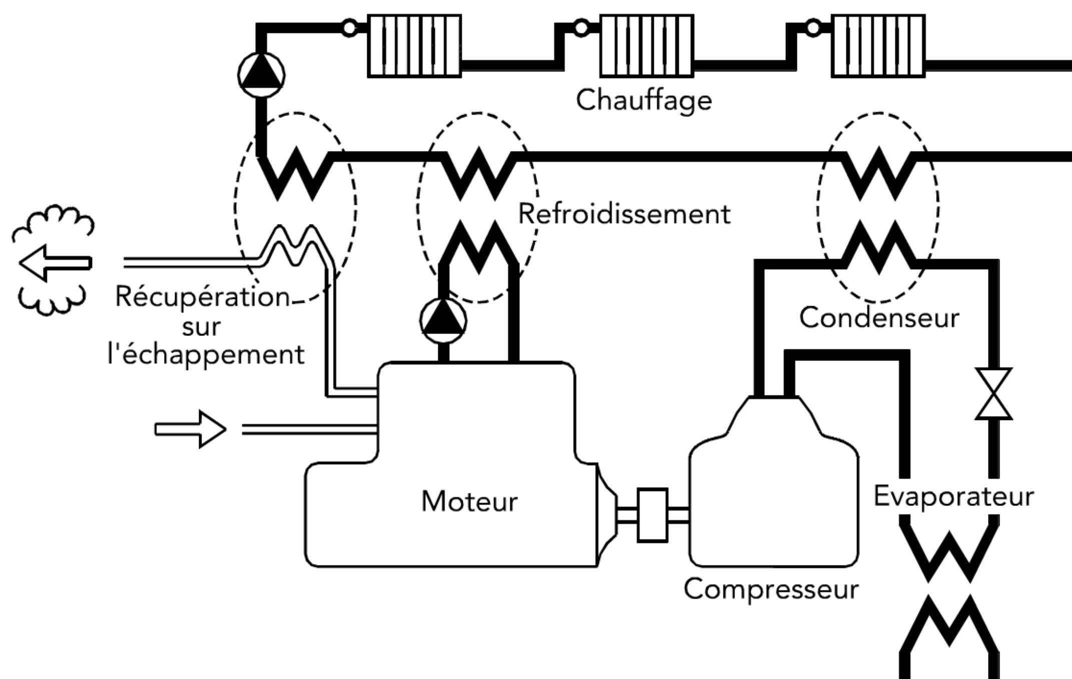


Figure 3.10 – Pompe à chaleur entraînée par un moteur thermique

Le COP instantané sur énergie primaire est de 1,4 en mode chaud (équivalent à un COP électrique supérieur à 3,5).

Tableau 3.3 – Comparaison PAC électrique et PAC gaz en énergie primaire

	Énergie fournie	COP système	Énergie finale consommée	Énergie primaire	COP sur énergie primaire
	kWh utile		kWh final	kWh primaire**	
PAC moteur gaz*	100	1,4	71,4	71,4	1,40
PAC électrique	100	3,5	28,6	73,7	1,36

* rendement mécanique moteur : 0,4.
** équivalence : 1 kWh élec = 2,58 kWh primaire (coefficient de référence de la RT 2012).

Copyright © 2014 Dunod.

En mode chauffage, la récupération d'énergie sur le moteur permet de maintenir la puissance utile de la PAC, même par température d'air extérieur très basse. Lorsque cette dernière est supérieure à 7 °C, cette énergie peut être utilisée pour produire de l'ECS.

L'intérêt de l'entraînement du compresseur par un moteur thermique (*figure 3.10*) se situe à plusieurs niveaux :

- récupération de la chaleur fatale du moteur, eau de refroidissement, gaz d'échappement, ambiance locale ;
- amélioration du bilan en énergie primaire ;
- élévation du niveau de température après condenseur sans détérioration du coefficient de performance.

L'inconvénient se situe au niveau d'une maintenance plus contraignante et d'une modulation de la puissance plus délicate.

3.4.3 Évaporateur et condenseur

Ce sont des échangeurs de chaleur qui échangent avec les circuits véhiculant le fluide frigorigène au niveau de l'évaporateur et du condenseur.

Au niveau de l'évaporateur et du condenseur, il y a prélèvement par échange d'un fluide caloporteur qui peut être l'air extérieur, l'air extrait, l'eau glycolée, l'eau d'une nappe ou d'une rivière, ou directement le fluide frigorigène dans le cas des systèmes à détente directe (capteurs horizontaux).

Échangeur à air

L'échangeur à air est constitué soit par un tube en serpentin (faible puissance), soit par une batterie de tubes. L'air est soufflé par un ventilateur. L'échange est favorisé par des ailettes (*figure 3.11*). Les tubes sont généralement réalisés en cuivre ou en aluminium. L'air circule soit par convection naturelle autour de l'échangeur ou par soufflage *via* un ventilateur.

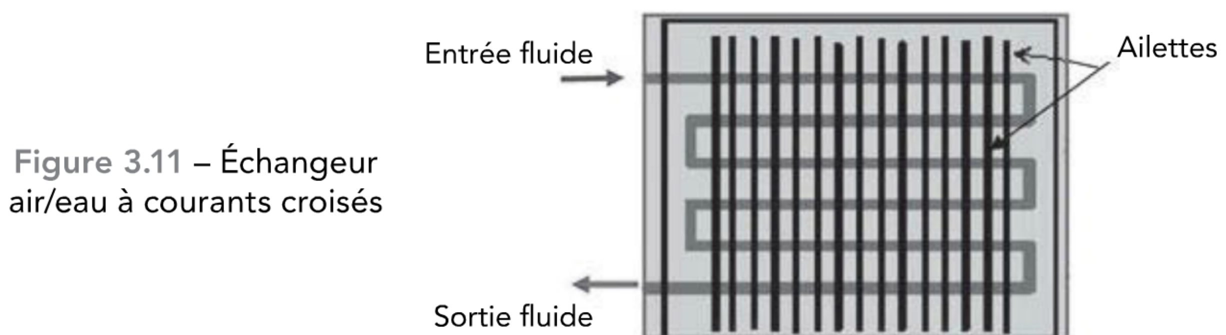


Figure 3.11 – Échangeur air/eau à courants croisés

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

Échangeur à eau

Lorsque le fluide caloporteur est de l'eau, l'échangeur peut être :

- à tubes concentriques ;
- à faisceau tubulaire ;
- à plaques ;
- à mini-canaux.

Système à tubes concentriques

Il est constitué de 2 tubes concentriques (*figure 3.12*) enroulés en spirale, généralement en cuivre. Le fluide frigorigène circule dans le tube intérieur, le fluide caloporteur (eau ou eau glycolée) circule entre le tube intérieur et extérieur.

Les tubes sont généralement cintrés et enroulés en hélice.

Une attention particulière doit être apportée à leur dimensionnement de façon à garantir leur efficacité dans un encombrement réduit.

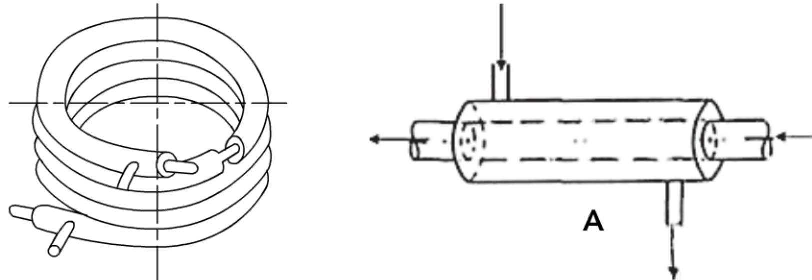


Figure 3.12 – Systèmes à tubes concentriques

Échangeur multitubulaire

L'échangeur multitubulaire est conçu pour réchauffer ou refroidir des fluides ou gaz sous haute pression. Il s'agit d'un faisceau de tubes traversant un réservoir de manière longitudinale.

Échangeurs à plaques

Pour les PAC air/eau et eau/eau, des échangeurs à plaques peuvent être utilisés. Les plaques sont en acier inoxydable ou parfois en titane si l'eau est très corrosive. Ils peuvent être à plaques brasées (*figure 3.13*) ou démontables (*figure 3.14*).

Par sa compacité, ce type d'échangeur présente l'avantage d'offrir une grande surface d'échange sous un faible volume.

Copyright © 2014 Dunod.

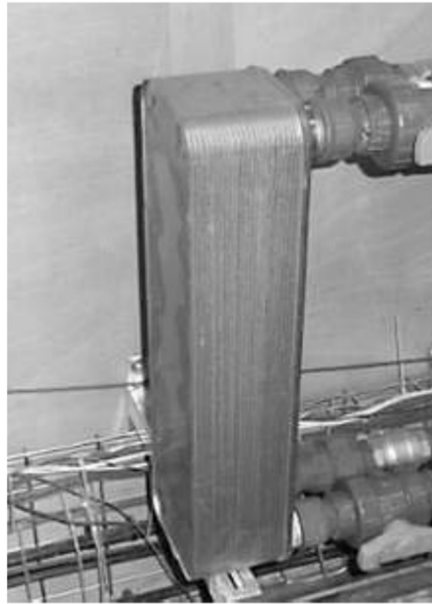


Figure 3.13 – Échangeur à plaques brasées

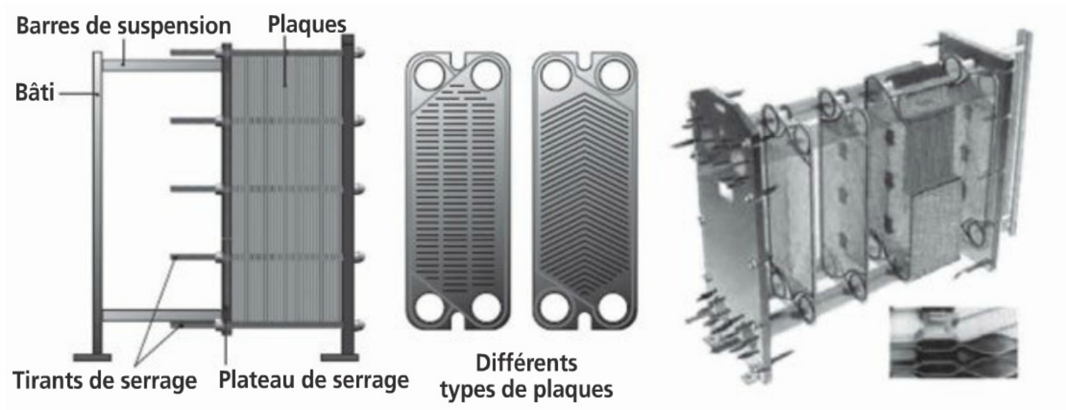


Figure 3.14 – Échangeur à plaques démontables

Échangeurs à mini-canaux

La technologie des échangeurs à mini-canaux (échangeurs brasés en aluminium – *figure 3.15*) est une technologie nouvelle qui offre de nombreux avantages :

- augmentation du coefficient d'échange thermique global ;
- une réduction de la quantité de la charge en frigorigène.

Dans le cas des systèmes dits à **détente directe**, il n'y a pas d'échangeur. C'est directement le fluide frigorigène qui est en contact avec la source froide et/ou la source chaude. C'est le cas lorsque, côté évaporateur, le fluide frigorigène circule dans des tubes enterrés dans le sol et dans la dalle de la pièce à chauffer, côté condenseur.

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

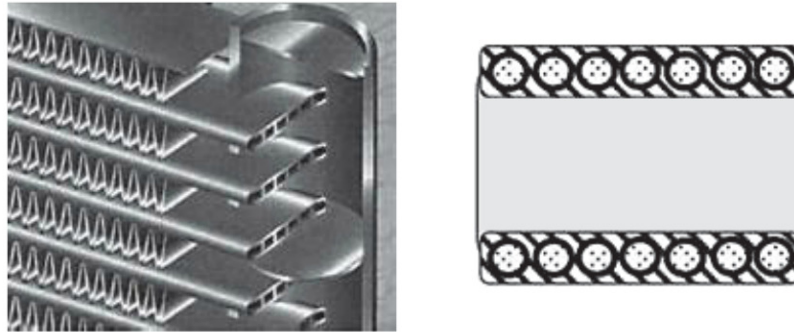


Figure 3.15 – Échangeurs à mini-canaux

3.4.4 Détendeur

La chute de pression entre le condenseur et l'évaporateur est provoquée par un détendeur.

Le tube capillaire (*figure 3.16*) est le plus simple des systèmes de détente, mais le débit n'est pas modulable. Il permet en fonction de la perte de charge créée dans le passage au travers du tube d'établir une différence de pression entre la zone condenseur (HP) et évaporateur (BP).

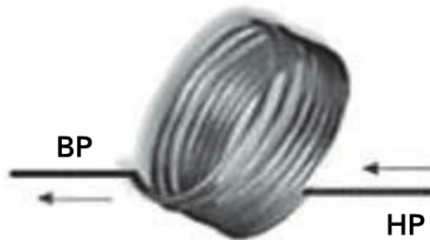


Figure 3.16 – Tube capillaire

Afin d'assurer un fonctionnement optimum sur une plus large plage de températures, 2 types de détendeurs peuvent être utilisés : le **détendeur thermostatique** et le **détendeur électronique**. Ces équipements de détente automatiques régulent le fluide de façon à introduire le débit de fluide adapté à la puissance demandée.

Un **détendeur thermostatique** (*figure 3.17*) est constitué d'un corps de vanne muni d'un orifice fixe et d'un pointeau mobile. La position du pointeau est contrôlée à partir d'une membrane **(2)**, d'un train thermostatique dont la pression interne est fonction de la température du bulbe **(1)** et d'un ressort, dont la force d'appui sur la membrane est contrôlée par une vis de réglage **(5)**. Si la charge thermique de l'évaporateur augmente, la sonde détectera une montée de température, agira sur la membrane et le pointeau **(4)** s'ouvrira afin d'augmenter le débit de réfrigérant.

Copyright © 2014 Dunod.

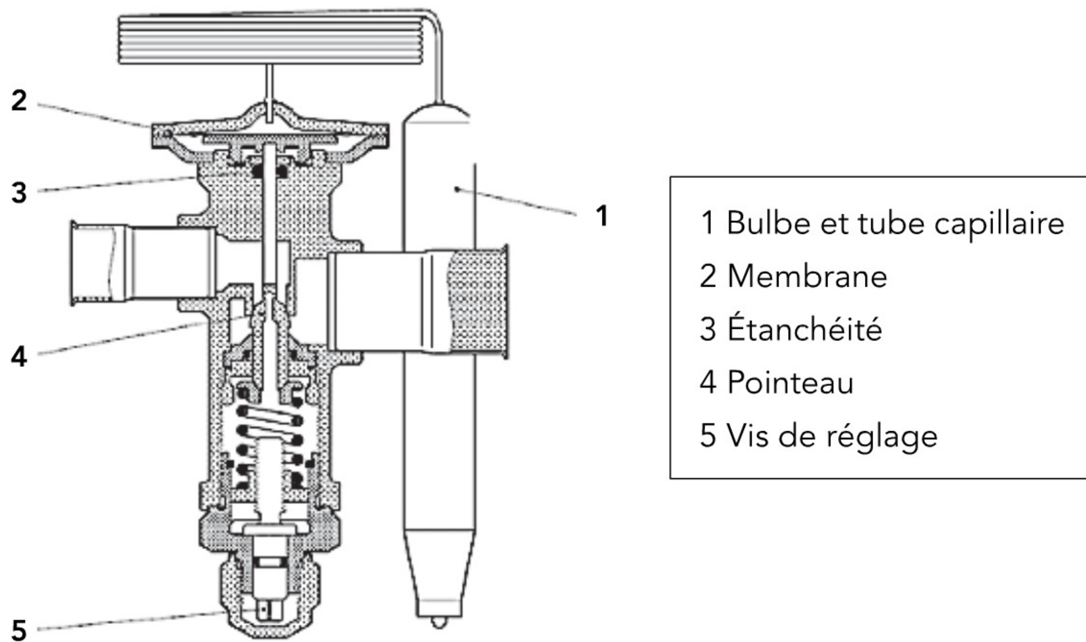


Figure 3.17 – Détendeur thermostatique (source Danfoss)

Le **détendeur électronique** fonctionne sur le même principe que le détendeur thermostatique mais il permet un réglage plus précis de l'injection à l'évaporateur. Il se compose d'une sonde de température (placée à la sortie de l'évaporateur contrôlant la surchauffe des gaz), d'une sonde de pression d'évaporation et d'une carte électronique dont le rôle est d'analyser ces valeurs et d'agir en conséquence sur une vanne de détente motorisée.

3.4.5 Équipements auxiliaires

Parmi les équipements auxiliaires, nécessaires au bon fonctionnement de la PAC, il faut citer sur le circuit du fluide frigorigène :

- un filtre déshydrateur : il permet l'absorption et la rétention d'eau. Il est placé après le voyant liquide et avant le détendeur ;
- une réserve tampon en aval du condenseur ;
- une bouteille anti-coups de liquide : elle se place entre l'évaporateur et le compresseur, elle évite l'aspiration de fluide frigorigène par le compresseur ;
- des systèmes de sécurité ou de mesure des pressions, température, quantité de fluide frigorigène en particulier : un voyant liquide qui permet de s'assurer que le fluide frigorigène est bien à l'état liquide et de contrôler son état d'hygrométrie.

Des pompes et ventilateurs sont nécessaires pour véhiculer les fluides chauffés ou refroidis en amont et aval de la PAC. Il sera nécessaire de les prendre en considération dans le bilan énergétique de la PAC.

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

La régulation et la programmation intégrant un certain nombre de fonctions : « jour et nuit », « été/hiver », ralenti, température réduite, hors gel…

3.5 Les fluides frigorigènes

Les fluides frigorigènes sont choisis pour leurs températures de passage de l'état liquide à l'état gazeux, et réciproquement. Il faut également tenir compte des pressions à mettre en jeu et de la quantité d'énergie nécessaire pour provoquer ce changement d'état.

Compte tenu de leur incidence en termes d'émission de gaz à effet de serre et pour les plus anciens, sur la destruction de la couche d'ozone stratosphérique, les fluides frigorigènes sont soumis à une réglementation de plus en plus contraignante. Parallèlement, des travaux de recherche s'intensifient pour trouver des produits de substitution plus favorable à l'environnement, c'est notamment le cas du CO_2.

Les fluides frigorigènes présents sur le marché sont soit des corps purs, soit des mélanges azéotropiques ou zéotropiques.

La particularité des **corps purs** comme des **mélanges azéotropiques** est la suivante : sous une pression donnée, le liquide commence toujours à bouillir à la même température. Sa température reste constante pendant toute la durée de l'ébullition. De même, sous une pression donnée, la vapeur commence toujours à se condenser à la même température et sa température reste constante pendant toute la durée de la condensation.

Pour les **mélanges zéotropiques**, on note un écart de température entre le début et la fin des phases d'ébullition et de condensation. Ce phénomène s'appelle le glissement. Par exemple, le glissement est de l'ordre de 5 °C pour le R 407C. Ce phénomène rend les réglages plus difficiles et rend obligatoire une circulation à contre-courant dans les échangeurs pour la meilleure efficacité.

Il est à noter que les fluides frigorigènes constituant un mélange de fluides n'ayant pas la même volatilité peuvent poser un problème en cas de microfuites. En effet, les composants ayant la plus grande volatilité s'échappent en premier, modifiant ainsi l'équilibre constitué initialement.

Dans ce cas, une recharge totale est nécessaire après avoir déchargé l'ensemble du fluide résiduel de l'installation.

Copyright © 2014 Dunod.

Parmi les gaz réfrigérants, on distingue différentes catégories de **molécules** :

- les chlorofluorocarbones (CFC), R11, R22 ;
- les hydrochlorofluorocarbones (HCFC) ;
- les hydrofluorocarbures (HFC) ;
- les hydrocarbures (alcanes ou PFC) ;
- les composés inorganiques : ammoniac, CO_2.

Les fluides frigorigènes les plus employés actuellement sont les HFC (hydrofluorocarbones). Ils ne contiennent plus de chlore comme c'était le cas pour les CFC (chlorofluorocarbones) qui sont maintenant interdits dans les nouvelles installations à cause de leur fort impact sur la réduction de la couche d'ozone.

Le rechargement au CFC des installations au cours d'opérations d'entretien et de maintenance est également interdit.

Il en est de même pour l'utilisation des HCFC (hydrochlorofluorocarbures) depuis le 1er janvier 2004 concernant les équipements neufs dans la mesure où leur impact sur la couche d'ozone, bien qu'inférieur aux CFC, n'est pas nul. Le rechargement des installations avec des HCFC au cours d'opérations d'entretien et de maintenance sera également interdit au 1er janvier 2015.

Chaque fluide frigorigène peut être caractérisé par deux indices caractéristiques, qui sont fonction de leurs impacts respectifs sur l'environnement.

ODP (*Ozone Depresion Potential*) : c'est le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone. Il s'étend de 0 à 1, un gaz ayant un ODP de 1 serait très dangereux pour la couche d'ozone. Exemple : ODP (R22) = 0,05 ; ODP (R404a) = 0.

GWP (*Global Warming Potential*) : Potentiel de réchauffement global (PRG).
Cet indice mesure l'impact du gaz en matière de réchauffement climatique dans l'atmosphère en comparaison du CO_2 (GWP = 1) pendant une période de 100 ans (ce qui correspond au temps nécessaire à l'élimination du CO_2).

On constate que ces indices sont très élevés (voir *tableau 3.4*).

Une installation peut être caractérisée par un indicateur spécifique.

TEWI : représentatif de la pollution générée par un appareil sur toute sa durée de vie, que ce soit de manière directe (émissions) ou indirecte (consommation d'électricité), avec comme formule :

$$\text{TEWI} = \underbrace{\text{GWP}[M(1-x) + M \times f \times N]}_{\text{effet direct}} + \underbrace{\text{EAN}}_{\text{effet indirect}}$$

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

avec :

- M : masse de fluide contenue dans la machine ;
- x : fraction de charge de fluide récupérée en fin de vie ;
- f : taux de fuite annuel de la machine ;
- N : durée de vie en année de la machine ;
- E : consommation annuelle de la machine en kWh.

Le *tableau 3.4* donne les caractéristiques des principaux fluides frigorigènes.

Tableau 3.4

Nature	R134 A	R407 C	R410 A
	HFC (fluide pur)	HFC (mélange zéotrope)	HFC (mélange zéotrope)
Point critique	101 °C / 40,7 bars	86,2 °C / 46,2 bars	70,2 °C / 49,5 bars
T ébullition à P atm	–26 °C	–43,4 °C	–51,6 °C
GWP_{100}	1 300	1 526	1 730
Inflammabilité	non	non	non
Toxicité	non	non	oui
Utilisation	Bonne performance énergétique pour grande puissance	Température d'utilisation jusqu'à 65 °C	Température d'utilisation jusqu'à 45 °C

À noter également la nécessité d'une bonne compatibilité de l'huile nécessaire au bon fonctionnement du compresseur avec le fluide frigorigène.

Autres fluides frigorigènes

Les fluides frigorigènes HFC décrits ci-dessus sont ceux majoritairement utilisés actuellement dans les installations de PAC neuves. Leurs valeurs de GWP sont élevées et donc, leur impact sur l'effet de serre important si des précautions ne sont pas prises (*paragraphe Bilan environnemental*). Leur utilisation est très encadrée par une réglementation qui a évolué ces dernières années. Il n'en demeure pas moins que la recherche de solutions alternatives doit être développée, soit à partir de produits connus comme l'ammoniac ou le propane (avec leurs inconvénients), soit à partir de nouveaux fluides naturels comme le dioxyde de carbone, que l'on commence à trouver dans certains chauffe-eau thermodynamiques dont les applications sont en phase de recherche-développement. Les principales caractéristiques de ces fluides sont détaillées ci-après.

Copyright © 2014 Dunod.

L'ammoniac R717

L'ammoniac a été le premier fluide frigorigène utilisé dans les machines frigorifiques. Il présente de nombreux avantages en tant que fluide frigorigène :

- pas d'impact sur la couche d'ozone ni sur l'effet de serre (GWP = 0,1) ;
- coefficient de performance équivalent aux HFC ;
- faible prix de revient et faibles frais d'entretien des installations ;
- chimiquement stable, aisément absorbable dans l'eau, biodégradable.

L'ammoniac est bien adapté aux « PAC haute température » compte tenu de sa température critique élevée (132 °C).

Cependant, l'ammoniac a pour inconvénient majeur d'être toxique et irritable et même d'être explosif dans certains cas exceptionnels (locaux insuffisamment aérés).

Son utilisation dans les machines thermodynamiques est réservée aux installations de grandes puissances comportant toutes les mesures de sécurité nécessaires.

Le propane R290

Ce fluide frigorigène courant et bon marché a un impact réduit en termes de contribution à l'effet de serre (GWP = 3).

D'un point de vue thermodynamique, ses performances sont bien adaptées pour les PAC. Le propane est compatible avec toutes les huiles de lubrification. Son inconvénient majeur est son inflammabilité, ce qui en limite son utilisation sous certaines conditions. On l'utilise donc en quantités les plus faibles possible (maximum 3 kg pour les applications résidentielles), de préférence à l'extérieur des bâtiments. Le propane est difficilement applicable aux systèmes à détente directe.

Le dioxyde de carbone R744

Le CO_2 est un gaz abondant, facilement mobilisable à faible coût.

Un cycle thermodynamique utilisant le CO_2 peut théoriquement parfaitement convenir dans les PAC pour des applications de chauffage ou de fourniture d'eau chaude sanitaire. La difficulté provient de la nécessité pour son fonctionnement dans une machine thermodynamique d'avoir recours à des pressions particulièrement élevées (100 bars). Cette technologie semble parfaitement maîtrisée au Japon, elle permet d'obtenir des températures pouvant aller jusqu'à 65 °C, d'où son utilisation dans les chauffe-eau thermodynamiques. Compte tenu de sa

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

température critique relativement basse (31,1 °C), il évolue avec un cycle transcritique nécessitant des pressions élevées.

Les quantités de fluide frigorigène varient suivant la nature des sources et du principe d'échange au niveau du condenseur et de l'évaporateur :

Quelques ordres de grandeur :

- pompe à chaleur eau/eau (aquifère ou sondes eau glycolée) : 125 g/kW ;
- pompe à chaleur à détente directe (fluide frigorigène circulant dans les capteurs) : 1 250 g/kW ;
- pompe à chaleur air/air : 500 g/kW.

À compter du 5 juillet 2011, tout personnel manipulant des fluides frigorigènes devra être titulaire d'une certification de personne, appelée « attestation d'aptitude ».

3.6 Pompe à chaleur réversible

Une pompe à chaleur est appelée PAC réversible (ou inversible) quand elle peut produire du chaud ou du froid selon la configuration du cycle frigorifique. L'inversion du cycle est assurée par une vanne à 4 voies comme cela est indiqué dans la *figure 3.18*.

La pompe à chaleur réversible permet d'assurer le chauffage en hiver et le rafraîchissement en été. Le basculement été/hiver se fait manuellement, le condenseur devient évaporateur et l'évaporateur devient condenseur.

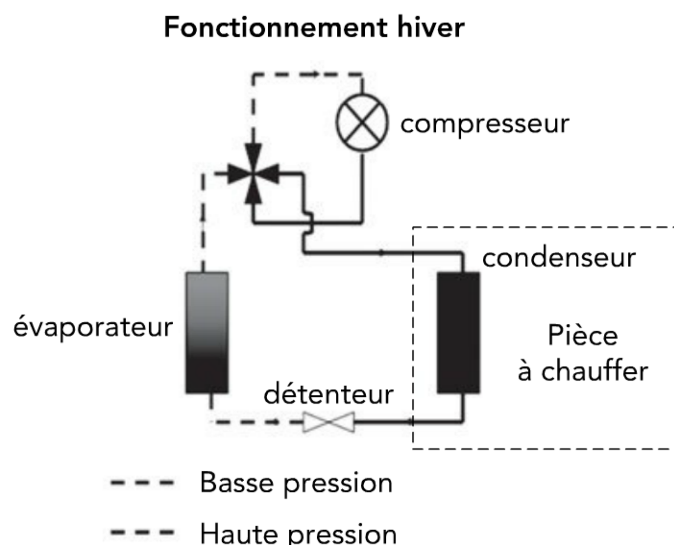


Figure 3.18 – Schémas de principe d'une pompe à chaleur réversible

Copyright © 2014 Dunod.

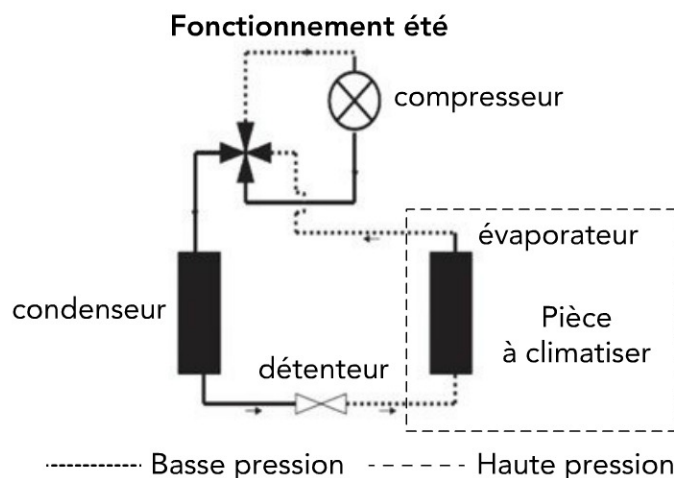


Figure 3.18 *(suite)* – Schémas de principe d'une pompe à chaleur réversible

3.7 Thermofrigopompe

De nombreux équipements ont des besoins simultanés de chaud et de froid. C'est le cas notamment des centres commerciaux, des cliniques, de certains bureaux, des associations piscine-patinoire…

La pompe à chaleur peut fournir à la fois le chaud et le froid. On désigne ce principe de fonctionnement sous le terme de thermofrigopompe.

La pompe à chaleur alimente 2 réseaux distincts : un réseau d'eau glacée à partir de l'évaporateur et un réseau d'eau chaude à partir du condenseur.

Les *figures 3.19 et 3.20* mettent en évidence les besoins de chaud et de froid d'un bâtiment complexe (bureaux, studios, salles de conférences).

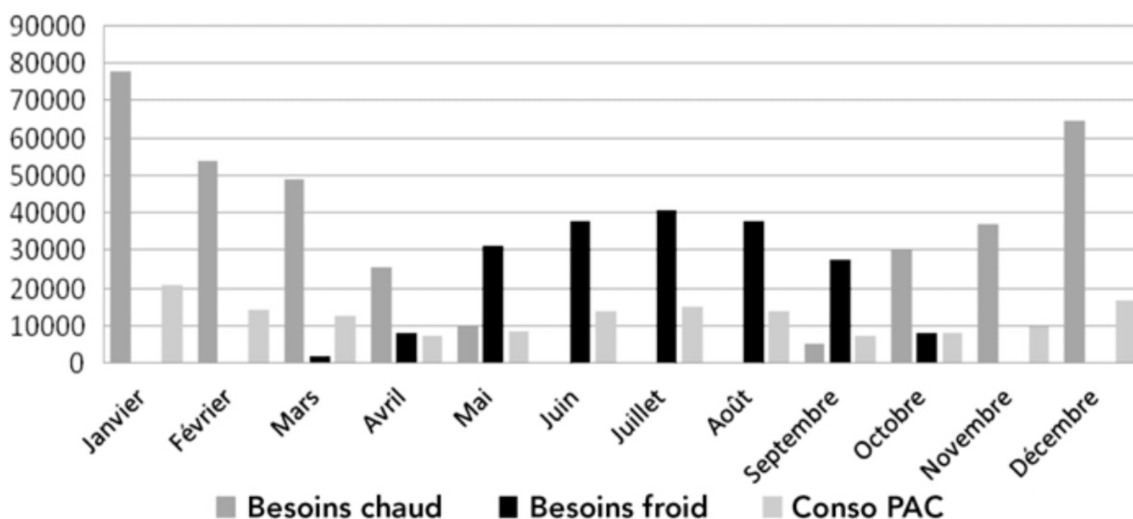


Figure 3.19 – Besoins du bâtiment et des consommations de la PAC

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

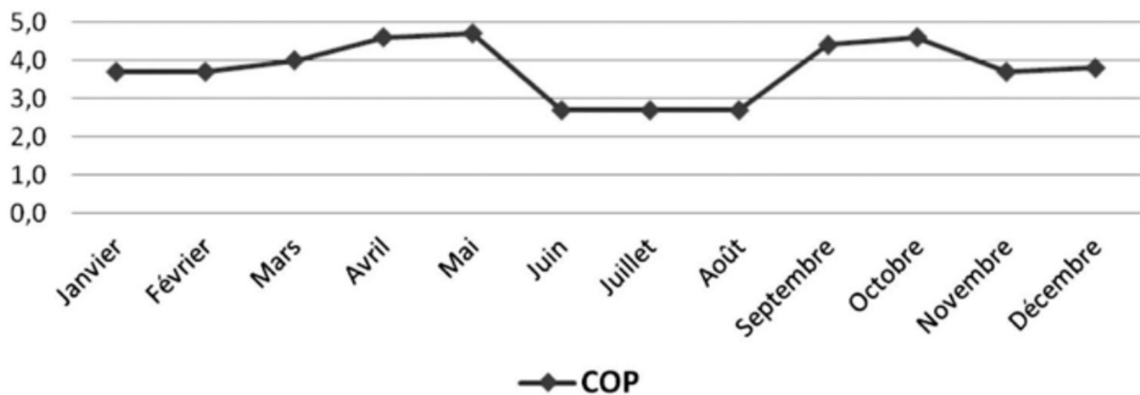


Figure 3.20 – Évolution du COP

On constate que le COP global mensuel est le plus élevé pour les périodes où les besoins de chaud et de froid sont simultanés (demi-saison).

En fonction des besoins à satisfaire, différents schémas de fonctionnement peuvent être envisagés.

Cinq cas de fonctionnement peuvent être rencontrés :

- chaud seulement ;
- chaud et froid avec rejet froid sur le forage, chaud > froid ;
- chaud et froid sans rejet, chaud = froid ;
- chaud et froid avec rejet chaud sur le forage, froid > chaud ;
- froid seulement.

Les graphiques ci-dessous illustrent deux cas de fonctionnement pour installation sur nappe :

1) Le bâtiment a des besoins de chaud et de froid (chaud>froid) **(mi-saison, début hiver).** Le froid produit est excédentaire, une partie est rejetée dans la nappe.

Le bâtiment a des besoins de chaud supérieurs aux besoins de froid (mi-saison et début d'hiver).

Le froid excédentaire est évacué dans le forage géothermique.

Copyright © 2014 Dunod.

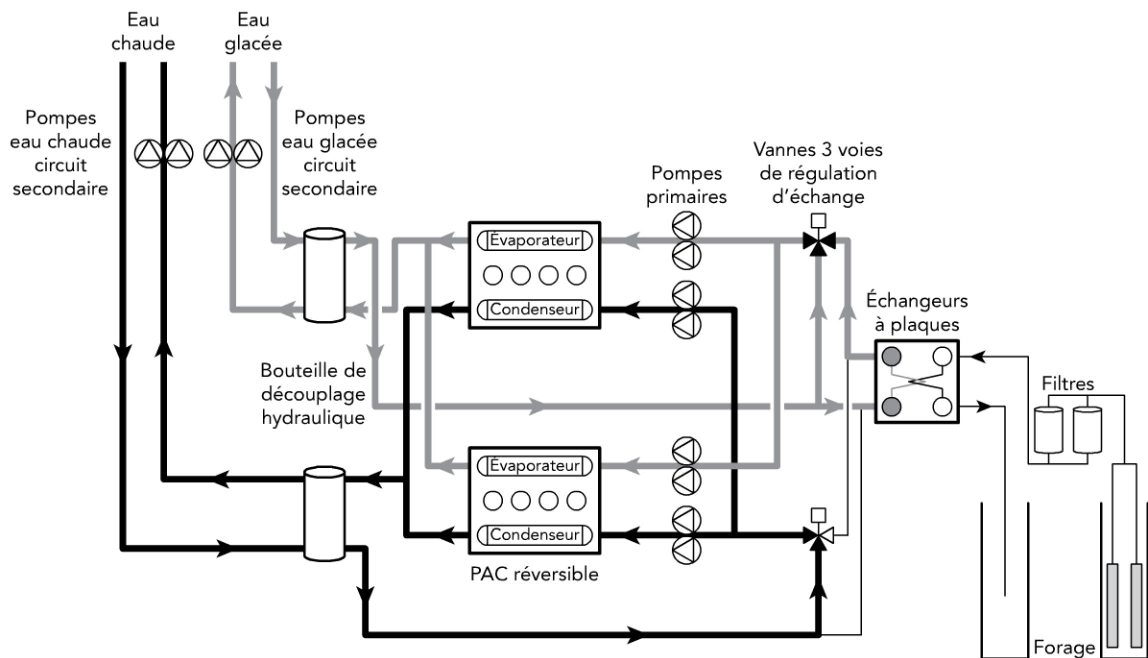


Figure 3.21 – Schéma de fonctionnement d'une thermofrigopompe (chaud>froid) (source : Edf)

2) Le bâtiment a des besoins de chaud et de froid (froid>chaud) **(mi-saison chaude, début été).** Le chaud produit est excédentaire, une partie est rejetée dans la nappe.

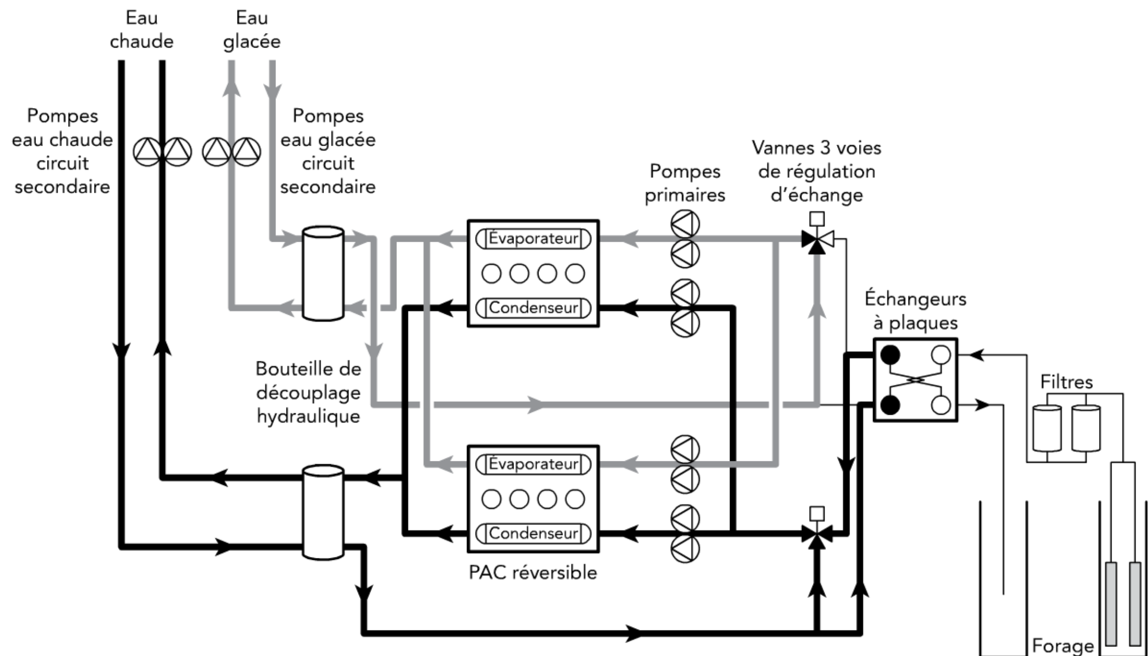


Figure 3.22 – Schéma de fonctionnement d'une thermofrigopompe (froid>chaud) (source : Edf)

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

3) Lorsque les besoins de froid au niveau de l'évaporateur correspondent aux besoins de chaud au niveau du condenseur, il n'y a pas d'échange avec la source externe. Dans cette configuration, le COP (chaud + froid) est maximum.

La production de chaud et de froid peut se faire soit par un système centralisé qui distribue les fluides à partir du même local technique, soit par un système décentralisé où chaque local à climatiser possède son propre système thermodynamique.

3.8 Pompes à chaleur haute température

Une pompe à chaleur sera dite « haute température » si elle est capable de fournir de l'eau chaude à une température supérieure à 60 °C. Cette température est souvent nécessaire pour l'alimentation des radiateurs et la fourniture d'eau chaude sanitaire.

Parmi les systèmes pouvant être envisagés : un système à 2 compresseurs montés en cascades (*figure 3.23*) ou le système à injection de vapeur (*figure 3.24*), dit EVI (*Enhanced Vapour Injection*).

Ces 2 systèmes, cascade et EVI, sont bien adaptés au marché de la rénovation car ils sont souvent équipés de systèmes de chauffage de type radiateurs nécessitant des températures du fluide chauffant supérieures à 60 °C.

3.8.1 Système à 2 compresseurs montés en cascades

Le montage en cascade équipé de 2 compresseurs permet un fonctionnement à 2 allures selon les besoins et le niveau de température requis.

Deux circuits de pompe à chaleur sont montés l'un derrière l'autre dans un groupe et reliés thermiquement entre eux par un échangeur de chaleur central. Ce dernier est le condenseur de la première allure et en même temps l'évaporateur de la seconde allure.

Les 2 circuits contiennent normalement 2 fluides frigorigènes différents du R 404A pour la première allure et du R 134A pour la seconde, par exemple.

Le deuxième circuit permet d'obtenir une température plus élevée (65 °C-70 °C par exemple) en relevant le niveau de température du 1er circuit (50 °C par exemple) avec un COP satisfaisant mais néanmoins inférieur à une PAC à un seul compresseur fournissant de l'eau à 50 °C.

Copyright © 2014 Dunod.

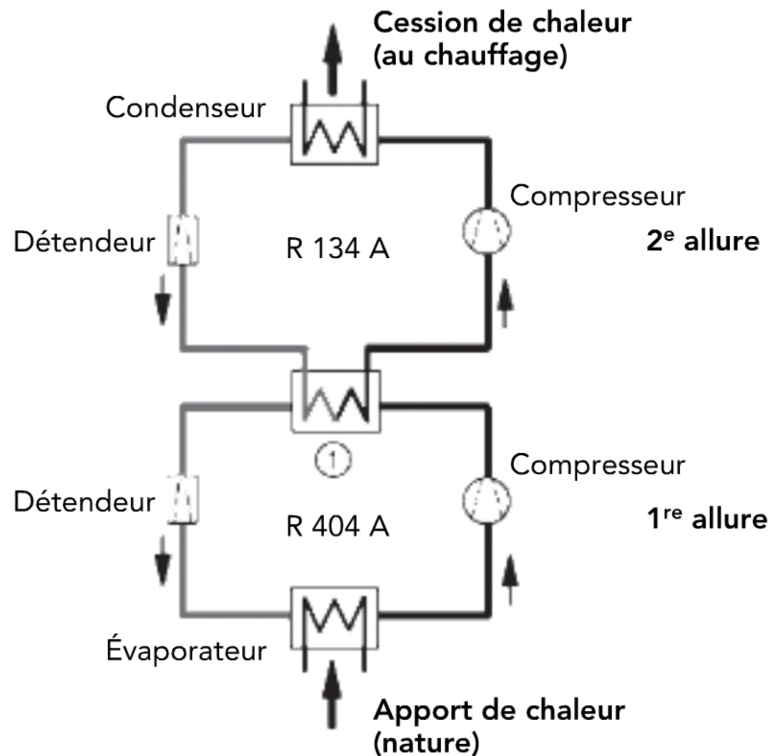


Figure 3.23 – Schéma simplifié d'un système à 2 allures de compresseur (source Viessman)

Pour les systèmes de pompe à chaleur air extérieur/eau, les températures élevées ne peuvent pas toujours être atteintes si les températures extérieures sont très basses. Cet inconvénient majeur ne s'applique pas aux PAC géothermiques dont la température de la source froide est constante et plus élevée que l'air extérieur pendant les jours les plus froids.

3.8.2 Cycle EVI (*Enhanced Vapour Injection*)

La conception « EVI » utilise le fluide de travail et une injection à vapeur intermédiaire. Le principe (*figure 3.24*) consiste à prélever une partie du fluide frigorigène à la sortie du condenseur et de l'injecter après détente au sein du compresseur (Scroll).

Comparé à un procédé conventionnel, ce système permet une température de condensation maximale plus élevée. Cette technique, tout en limitant la température des gaz à la sortie du compresseur, provoque une augmentation sensible des performances et une amélioration du « COP ». Le système EVI permet également 2 allures de fonctionnement, avec ou sans injection à vapeur.

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

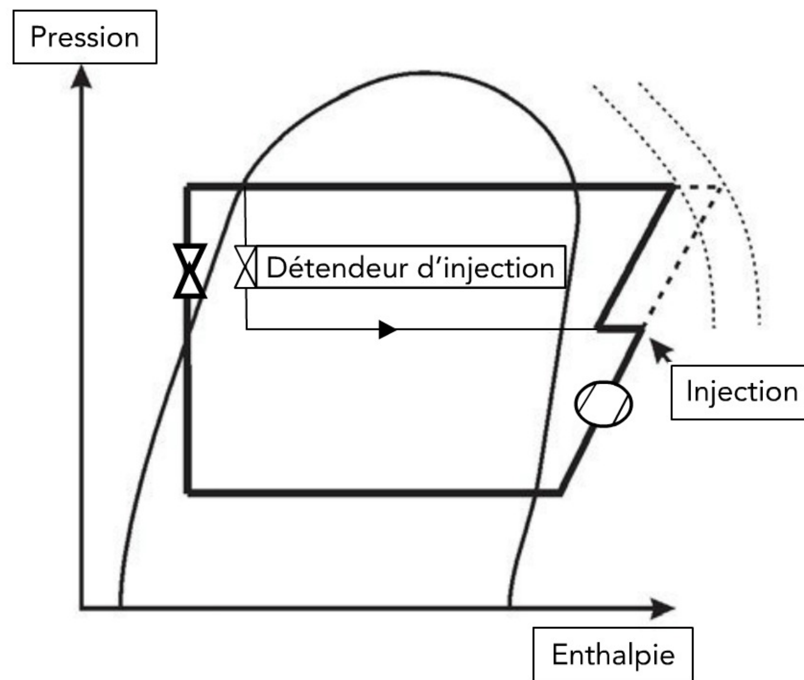


Figure 3.24 – Diagramme enthalpique du cycle EVI

Copyright © 2014 Dunod.

4 Pompes à chaleur à absorption

Dans une pompe à absorption, la compression mécanique est remplacée par une compression thermochimique. Le principe est fondé sur l'affinité d'un fluide frigorigène pour un autre liquide, par exemple de l'ammoniac pour l'eau ou de l'eau pour le bromure de lithium. La pompe à chaleur à absorption a jusqu'alors été le plus souvent utilisée pour produire du froid, mais elle présente des possibilités intéressantes pour produire du chaud. L'énergie thermique apportée au système est généralement du gaz naturel, mais peut provenir d'une autre source (solaire, biomasse, énergie de récupération…).

4.1 Principe de fonctionnement

L'avantage de la pompe à chaleur à absorption (*figure 4.1*) réside dans une bonne utilisation de l'énergie primaire et dans le fait que, mis à part la pompe de transfert, il n'y a pas de pièces en mouvement. De plus, le fluide frigorigène utilisé est quasiment sans impact sur l'effet de serre.

Les machines à absorption de grande puissance (supérieure à 50 kW) sont courantes comme groupes frigorifiques.

Pour les petites et moyennes puissances, il existe un marché utilisant le gaz naturel comme source d'énergie. Le coefficient de conversion entre énergie primaire et énergie finale est largement favorable avec le gaz naturel.

La récupération de chaleur sur une PAC à absorption a pour origine 3 sources :

- par condensation du fluide frigorigène au niveau du condenseur ;
- par la réaction d'absorption entre le fluide et l'absorbant (réaction exothermique) ;
- par récupération de la chaleur latente des fumées si la source de chaleur est du gaz.

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

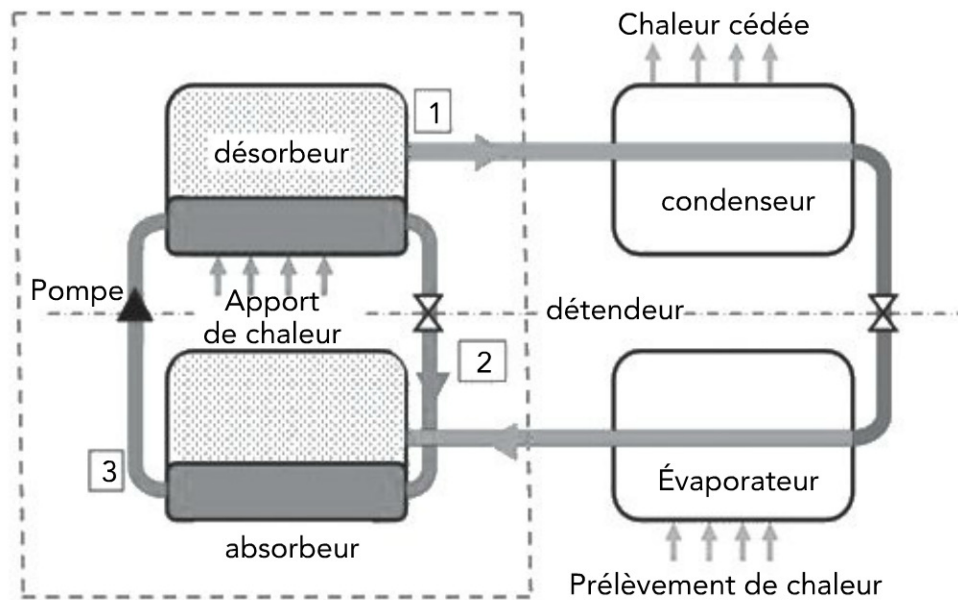


Figure 4.1 – Schéma de fonctionnement d'une machine à absorption

(1) Le mélange riche en fluide frigorigène est chauffé dans le désorbeur (ou bouilleur). Le fluide frigorigène se vaporise et se sépare de l'absorbant, puis est envoyé vers le cycle classique : condenseur, détendeur, évaporateur.

(2) Le mélange pauvre en fluide frigorigène retourne dans l'absorbeur.

(3) La vapeur issue de l'évaporateur se dissout et enrichit la solution contenue avant d'être renvoyée vers le désorbeur puis le cycle recommence.

Les COP peuvent atteindre jusqu'à 1,6 sur PCI selon les matériels. Cette technique est largement développée au Japon et aux États-Unis. En France, un petit nombre d'installations ont vu le jour ces dernières années, principalement alimentées par du gaz naturel.

Actuellement, **2 types d'installations sont utilisés en France** :

- Les **groupes à absorption au bromure de lithium** (couple bromure de lithium/eau), qui assurent la production d'eau glacée pour le refroidissement et celle d'eau chaude pour le chauffage, alternativement ou simultanément. Le circuit de refroidissement de la machine est hydraulique (eau de nappe ou forage, d'étangs, lacs, rivières, tour de refroidissement, etc.). Les puissances disponibles vont de 100 kW à plusieurs MW. Les groupes sont installés soit en chaufferie, soit à l'extérieur.

Le bromure de lithium (LiBr) est utilisé en solution aqueuse dans les machines à absorption. Il se présente sous forme de fins cristaux blancs de densité 3,46. Il est

Copyright © 2014 Dunod.

fortement hygroscopique, d'où son utilisation comme absorbeur. Il est incombustible, non explosif et ne présente pas de danger pour l'homme. Aucune réglementation ne lui est assujettie à ce jour.

- Les **groupes à absorption à l'ammoniac** (couple eau/ammoniac), principalement utilisés pour la production de froid. Les puissances disponibles varient du module froid de 20 kW à 85 kW au module chaud de 30 à 180 kW. La PAC à absorption est souvent associée à une chaudière à condensation permettant ainsi d'assurer la puissance nécessaire aux plus basses températures.

En production de froid, l'eau est limitée en température, son point triple étant de 0,01 °C. Dans la pratique, il devient difficile de descendre en dessous de 2 °C, la pression étant de moins de 7 millibars et sa masse volumique de 5,5 g/m^3. Néanmoins, toutes les applications du domaine de rafraîchissement (>5 °C) lui sont accessibles. Dans la production de froid par absorption, l'eau constitue le fluide frigorigène lorsqu'elle est associée au bromure de lithium (absorbeur). Dans la technologie ammoniac/eau, elle joue le rôle d'absorbeur.

À noter une variante, à savoir la pompe à chaleur à « absorption-diffusion à gaz », qui utilise des fluides frigorigènes composés d'eau, d'ammoniac et d'hélium. Le procédé est sensiblement identique à celui d'une PAC à absorption à gaz. Le fluide frigorigène circule grâce aux différences de densité et de concentration des fluides occasionnées par les apports de chaleur. Cette technologie ne nécessite pas de pompe mécanique de transfert.

Les applications chauffage à partir de géothermie associées avec des PAC à absorption sont encore peu développées.

4.2 Exemples de réalisation

4.2.1 Exemple de récupération à partir d'une ressource géothermale

Le réseau de chaleur à Erding en Allemagne en fonctionnement depuis 1998, à partir d'une ressource géothermale à 48 °C. Il est équipé d'une PAC à absorption de 7 MW à 2 étages (eau bromure de lithium). La PAC permet de relever le niveau de température de l'eau distribuée dans le circuit de chauffage à 78 °C comme le montre la *figure 4.2*.

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

Tableau 4.1 – Caractéristiques de l'installation

Prélèvement géothermique		Apport chaleur gaz	Réseau de chaleur		COP
Températures	Puissance KW		Températures	Puissance kW	
48 °C	2 800	4 000	78 °C/52 °C	6 800	1,7

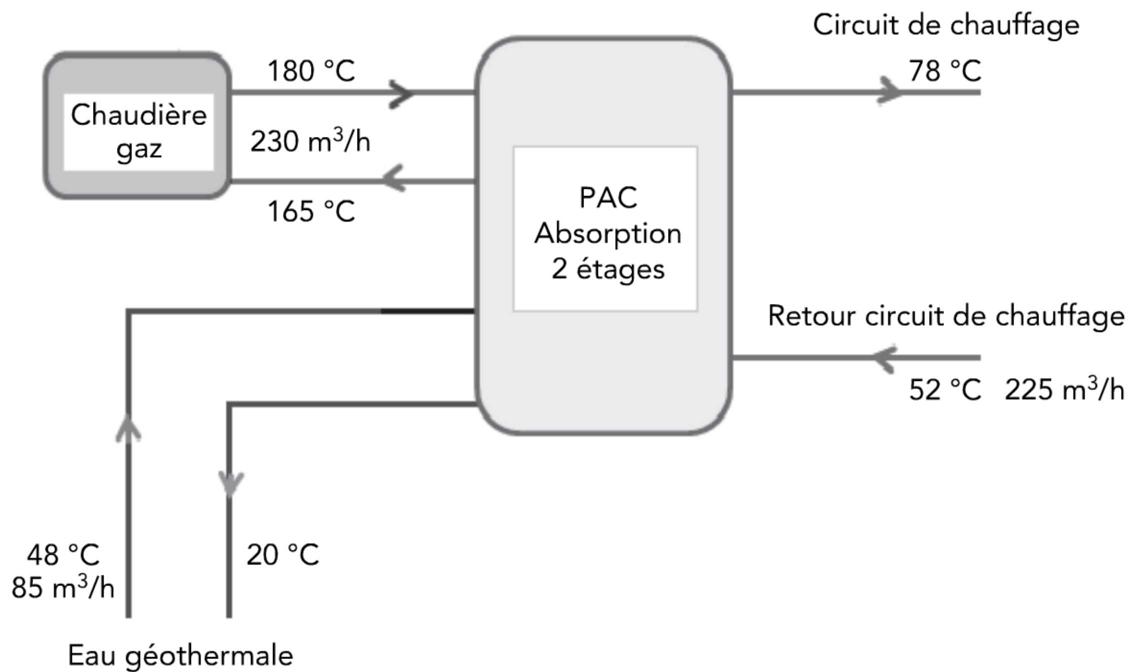


Figure 4.2 – Récupération de chaleur à partir d'une ressource géothermale (cas d'Erding)

4.2.2 Climatisation d'une salle de spectacle par pompe à absorption : exemple de la salle Gaveau (1 000 places) à Paris

La salle est équipée d'un groupe de production d'eau glacée à absorption avec production d'eau chaude. Il s'agit d'une machine simple effet eau/bromure de lithium de puissance frigorifique 280 kW et de puissance calorifique 320 kW. Le groupe a été dimensionné pour couvrir les besoins du site en froid et 2/3 des besoins en chaud ; le reste étant assuré par une chaudière gaz. Au niveau du condenseur (où n'intervient d'ailleurs aucune récupération de la chaleur), le refroidissement est assuré par un système aéro-réfrigérant implanté en terrasse. Le débit de la centrale de traitement d'air est dimensionné pour 40 000 m^3/h. Lorsque la machine fonctionne en mode rafraîchissement, la température de l'eau, après passage du circuit d'eau glacée dans l'échangeur, est refroidie de 12 °C à 7 °C. Par contre, quand la machine à absorption fonctionne en mode inverse (chauffage), l'eau du circuit de climatisation du bâtiment est alors réchauffée (et non refroidie) par la vapeur d'eau, de 50 à 55 °C.

Copyright © 2014 Dunod.

4.3 Comparaison : pompe à chaleur à compression et pompe à chaleur à absorption

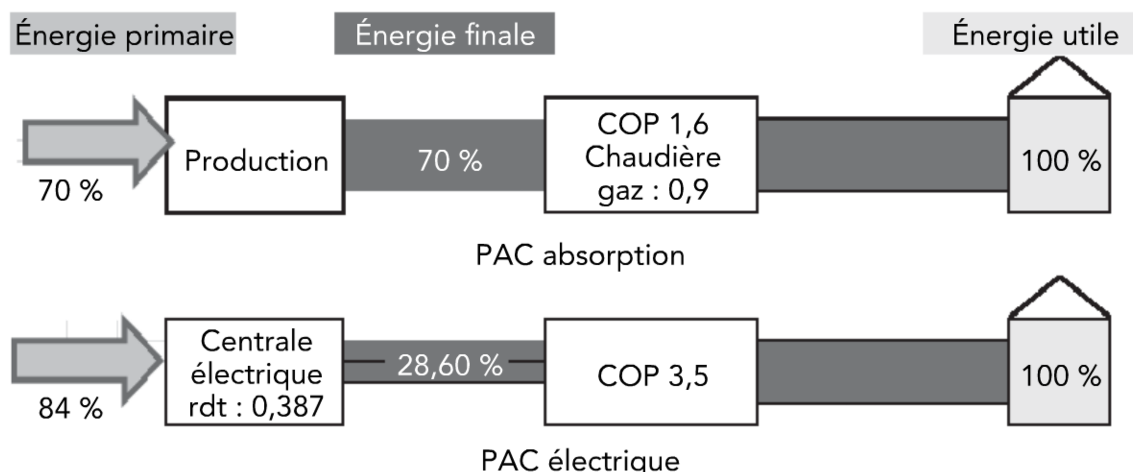


Figure 4.3 – Bilan énergie primaire

La comparaison en énergie primaire pour des applications chauffage (*figure 4.3*) donne un léger avantage à la PAC à absorption compte tenu des hypothèses de COP et de rendement retenues.

Concernant le bilan sur les émissions de CO_2, le *tableau 4.2* compare les solutions (production de chaleur).

Tableau 4.2 – Résultats comparatifs sur les émissions de CO_2

	PAC compression aquifère	PAC absorption aquifère	Chauffage gaz
Besoins utiles kWh	100	100	100
COP PAC	3,5	1,6	
Rendement chaudière		0,9	0,9
Électricité kWh	28,6		
Gaz kWh		69,4	111
Émissions liées au fluide frigorigène g CO_2/an	475	0	0
Émissions liées à l'énergie g CO_2/an	5 145	16 000	25 530
Total émissions g CO_2/an	5 620	16 000	25 530

Le bilan en termes d'émissions de CO_2 reste plus favorable aux pompes à chaleur à compression. La PAC à absorption demeure néanmoins plus favorable que la solution au gaz seul.

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

4.4 Performances de l'absorption pour différentes utilisations

Plusieurs types de fonctionnement de la PAC à absorption peuvent être envisagés comme le montre le *tableau 4.3*.

Tableau 4.3 – (source : fiche société Entropie)

Type de machine	Vecteur énergétique	Procédé	Énergie sortie machine	Applications *Performances*
Machine frigorifique alimentée haute température (170°)	1 000 kW Vapeur, eau surchauffée, gaz, fioul	Double effet	1 200 kW Eau glacée 6 °C	Conditionnement d'air, réfrigération industrielle, réseau de froid *1,2 MW de froid par MW d'énergie thermique*
Machine frigorifique alimentée basse température (90°)	Récupération de chaleur (eau chaude ou vapeur atmosphérique)	Simple effet	600 kW Eau glacée 6 °C	Climatisation, réfrigération à partir de récupération (groupe diesel, fumées) *0,6 MW de froid par MW récupéré*
Machine mixte froid/chaleur Alimenté haute température (170 °C)	1 000 kW Vapeur, eau surchauffée, gaz, fioul	Double effet 2 étages	300 kW Eau glacée 6 °C 1 300 kW Chaleur 80 °C	Production simultanée de froid (6 °C) et de chaleur (80 °C) *0,3 MW de froid et 1,3 MW de chaleur par MW d'énergie thermique*
Pompe à chaleur Élévation de température 40 °C	1300 kW Chaleur récupérée 40 °C 1 000 kW Vapeur, eau surchauffée, gaz, fioul	Double effet	2 300 kW Chaleur 80 °C	Récupération de chaleur perdue sur effluents, eaux tièdes *2,3 MW de chaleur utilisable à 80 °C par MW d'énergie thermique*
Pompe à chaleur Élévation de température de 80 °C	300 kW Chaleur récupérée 10 °C 100 kW Vapeur, eau surchauffée, gaz, fioul	2 étages	1 300 kW Chaleur 80 °C	Récupération de chaleur perdue sur eaux froides (10 °C) nappes phréatiques *1,3 MW de chaleur à 80 °C par MW d'énergie thermique*

Copyright © 2014 Dunod.

5 Détermination des besoins énergétiques

Les besoins énergétiques susceptibles d'être fournis à un bâtiment par une pompe à chaleur sont : le chauffage, l'eau chaude sanitaire et le rafraîchissement. La même machine thermodynamique pourra assurer soit une, soit deux, soit les trois fonctions.

5.1 Évolution des consommations énergétiques

La consommation spécifique des bâtiments neufs a considérablement évolué au cours de ces dernières années comme le montre la *figure 5.1*. Depuis 2005, la réglementation thermique concerne également sous certaines conditions la rénovation des bâtiments existants. Pour ces derniers, le Grenelle de l'environnement s'est fixé comme objectif une réduction de la consommation spécifique de 38 % d'ici 2020.

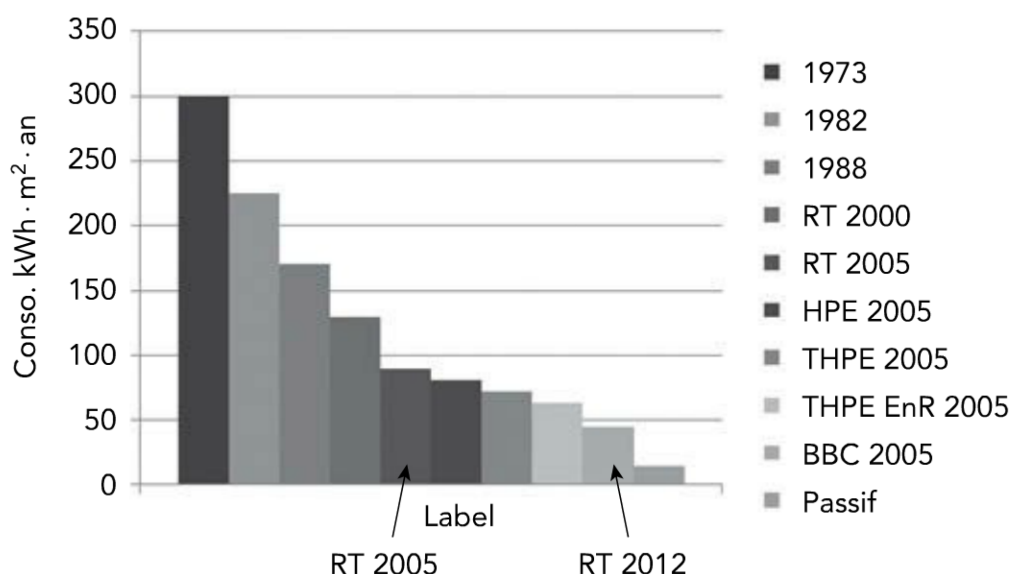


Figure 5.1 – Évolution des consommations des logements neufs depuis la première réglementation thermique de 1973

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

La performance thermique des bâtiments est exprimée en « énergie primaire par mètre carré par an ».

Elle représente la quantité d'énergie nécessaire pour satisfaire les besoins annuels du bâtiment qui peuvent se composer de chauffage, de rafraîchissement, de production d'eau chaude sanitaire, d'éclairage, de ventilation… Cette énergie est généralement rapportée au m² SHON (surface Hors Œuvre Nette) pour avoir un coefficient standard (kWhep/m²·an). Le *tableau 5.1* indique les différents niveaux de consommation des bâtiments en fonction de leurs caractérisations.

Tableau 5.1 – Évolution de la consommation énergétique du parc des bâtiments 2020 et 2050

Type de logement		2007	2010	2012	2020		2050
Logement neuf	Type de réglementation	RT 2005	THPE	Bâtiment basse consommation	Bâtiment passif	Énergie positive (PEbos)	Objectif Grenelle
	Consommation	105	85	60	0*	< 0**	< 0**
Logement existant	Type de réglementation	Conso moyenne	Rénovation de 400 000 logements/an		Réduction de 38 % des consommations		Objectif Grenelle
	Consommation	250	210		150		50

5.2 Détermination des besoins de chauffage

Les besoins de chauffage d'un bâtiment sont déterminés par les éléments suivants :

- l'état du bâtiment (matériaux de construction, niveau d'isolation…) ;
- les apports internes (habitants, équipements électroménagers, éclairage…) ;
- les apports extérieurs (l'ensoleillement) ;
- le comportement des habitants (niveau de température intérieure souhaitée…) ;
- le renouvellement d'air hygiénique.

L'installation de chauffage d'un bâtiment est caractérisée par sa capacité à assurer la température intérieure souhaitée (par exemple 20 °C) pour la température extérieure la plus basse susceptible d'être rencontrée sur le site Teb (par exemple Teb = –7 °C pour la région parisienne) (voir *figure 5.2*).

Copyright © 2014 Dunod.

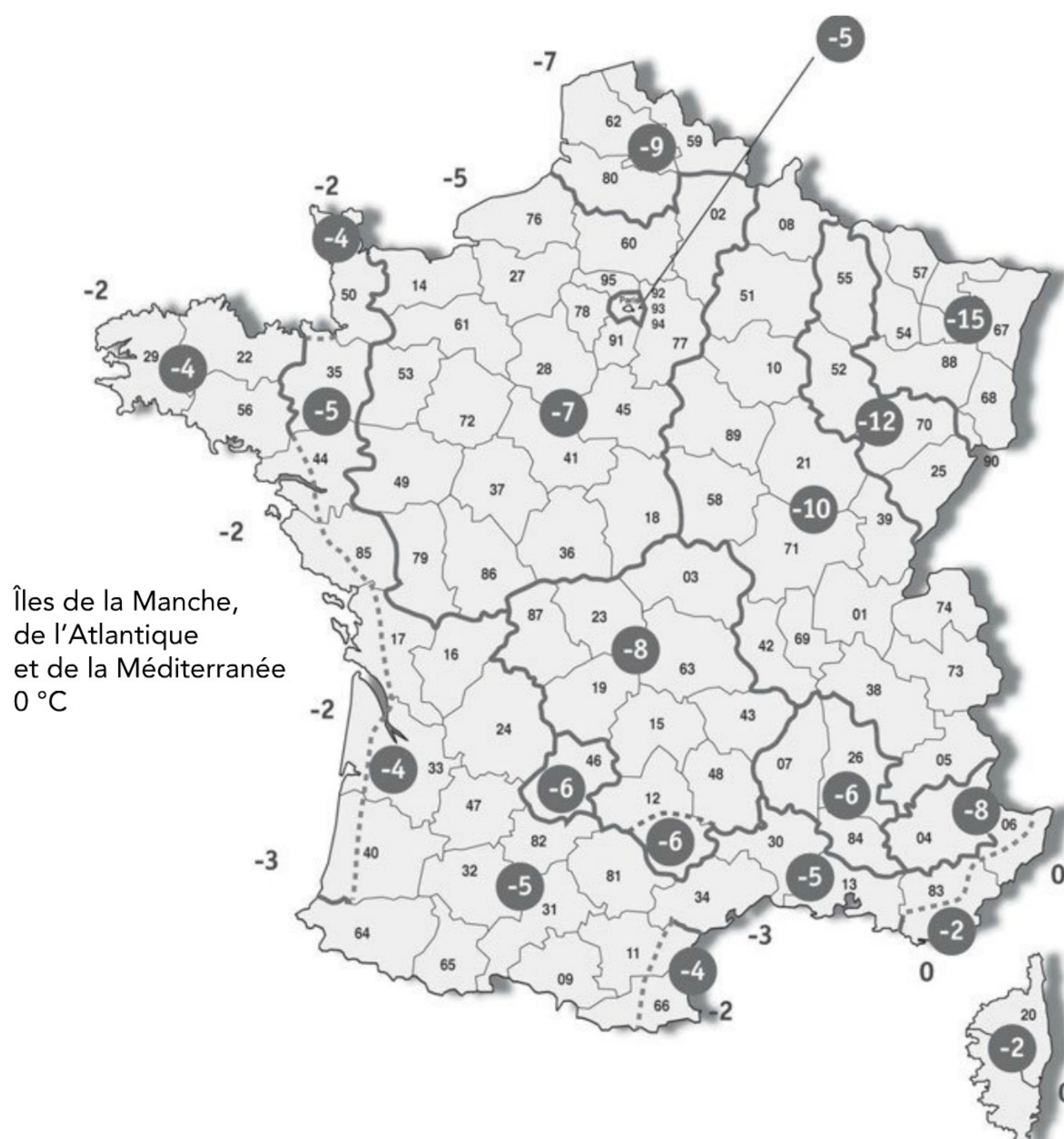


Figure 5.2 – Carte des températures minimales de base

On considère généralement qu'il existe des apports internes (personnes et appareils) et externes (soleil) représentant de l'ordre de 2 à 3 °C.

L'énergie consommée pour satisfaire les besoins de chauffage doit aussi prendre en compte les rendements de production et de distribution.

La *figure 5.3* illustre l'origine du bilan énergétique relatif au chauffage d'une maison.

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

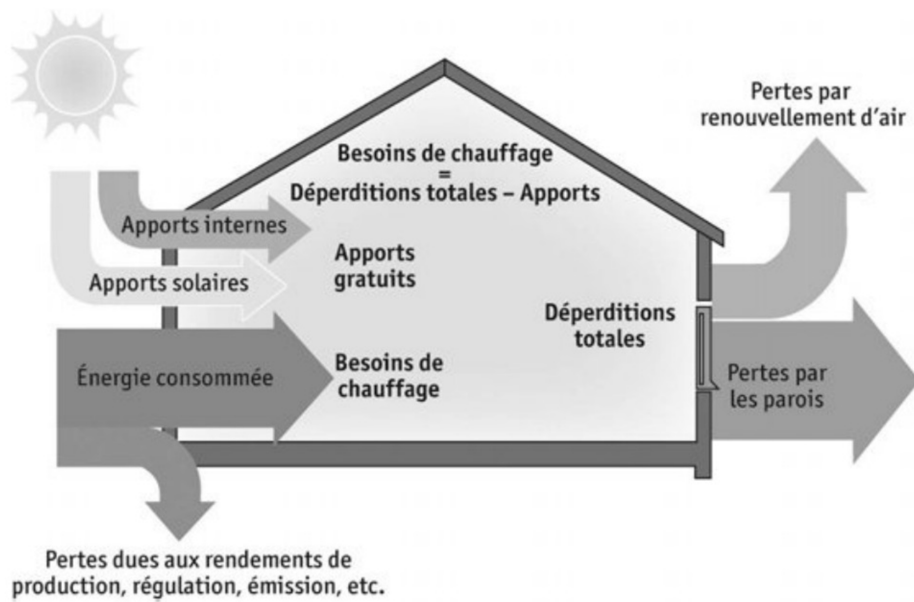


Figure 5.3 – Besoins de chauffage

Vis-à-vis de la réglementation (RT 2005), le calcul des déperditions (*figure 5.4*) doit être effectué à partir des données issues des calculs (règles ThC) notamment du coefficient Ubat caractérisant les déperditions par les parois du bâtiment.

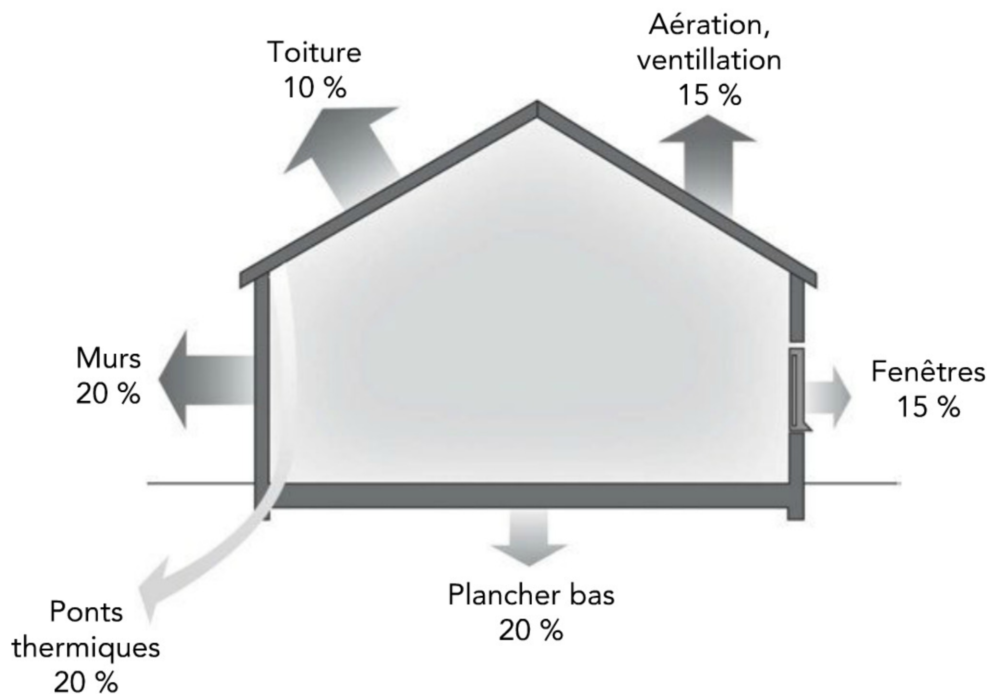


Figure 5.4 – Déperditions dans une maison isolée

Les déperditions d'un bâtiment sont évaluées en faisant la somme des déperditions par les parois, par les ponts thermiques et par le renouvellement d'air.

Copyright © 2014 Dunod.

5.2.1 Détermination de la puissance de chauffage

Les déperditions de base sont données par la formule :

$$P_d(W) = \underbrace{[\sum\{(Up \cdot Sp) + (Uw \cdot Sw) + (Y \cdot L)\} + 0{,}34 \cdot Q)] \times (Ti - T_{eb})}_{\mathbf{GV}}$$

Up : Coefficient de déperditions par les parois [W/m²·K]

Sp : Surface parois [m²]

Uw : Coefficient de déperditions des fenêtres [W/m²·K]

Sw : Surfaces fenêtres [m²]

Y : Coefficient de déperditions linéiques [W/m·K]

L : Longueur des ponts thermiques [m]

Q : Débit d'air du renouvellement d'air [m³/h]

Ti : Température intérieure souhaitée

Teb : Température extérieure de base

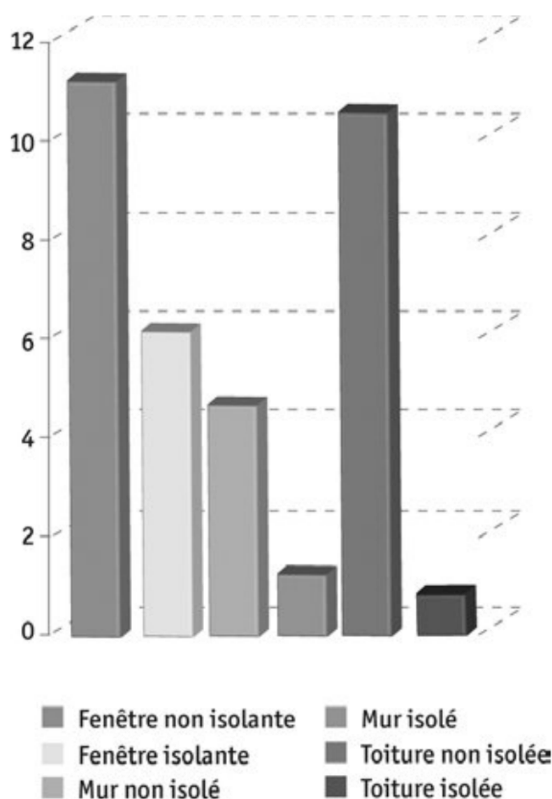


Figure 5.5 – Exemples de coefficients U (W/m²·K)

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

Le débit d'air de renouvellement peut être évalué par un coefficient en fonction du volume habitable (Vh) et du type de ventilation : RVh

- VMC autoréglable : R = 0,2
- VMC hygroréglable A : R = 0,14
- VMC hygroréglable B : R = 0,12

Le premier terme de la formule correspond au terme GV ou G qui est le coefficient de déperdition volumique exprimé en $W/m^3 \cdot K$ et V, le volume à chauffer en m^3.

Le coefficient G varie de 0,35 (bâtiment respectant la réglementation thermique 2012) à > 2 pour une maison des années 1950 non isolée.

La puissance utile pour vaincre les déperditions thermiques peut s'exprimer par la formule suivante :

$$P\ (W) = G \times V \times (Tint - Teb)$$

Exemple : Maison de 100 m² ; hauteur sous plafond 2,5 m

- Non isolée : G : 2 ; P = 2 x 100 × 2,5 × [18 – (–7)] = 12 500 W
- Maison RT 2005 G : 0,6 ; P : 0,6 × 100 × 2,5 × [18 – (–7)] = 3 750 W

La température **Tint** (18 °C) prend théoriquement en compte les apports gratuits, mais pour des maisons bien isolées et bénéficiant d'apports gratuits importants, la valeur Tint peut être remplacée par la température de non-chauffage **Tnc** qui, selon les cas, peut être inférieure de 2 à 5 °C à la température intérieure Tint conventionnelle.

5.2.2 Calcul des consommations chauffage

Pour calculer les consommations, il est nécessaire d'intégrer la fréquence d'apparition des températures extérieures nécessitant du chauffage (inférieure à la température extérieure de non-chauffage Tnc définie plus haut). Ce paramètre est caractérisé par un nombre de degrés-jours unifiés (DJU) donné par la station météo locale la plus proche et disponible auprès de Météo-France.

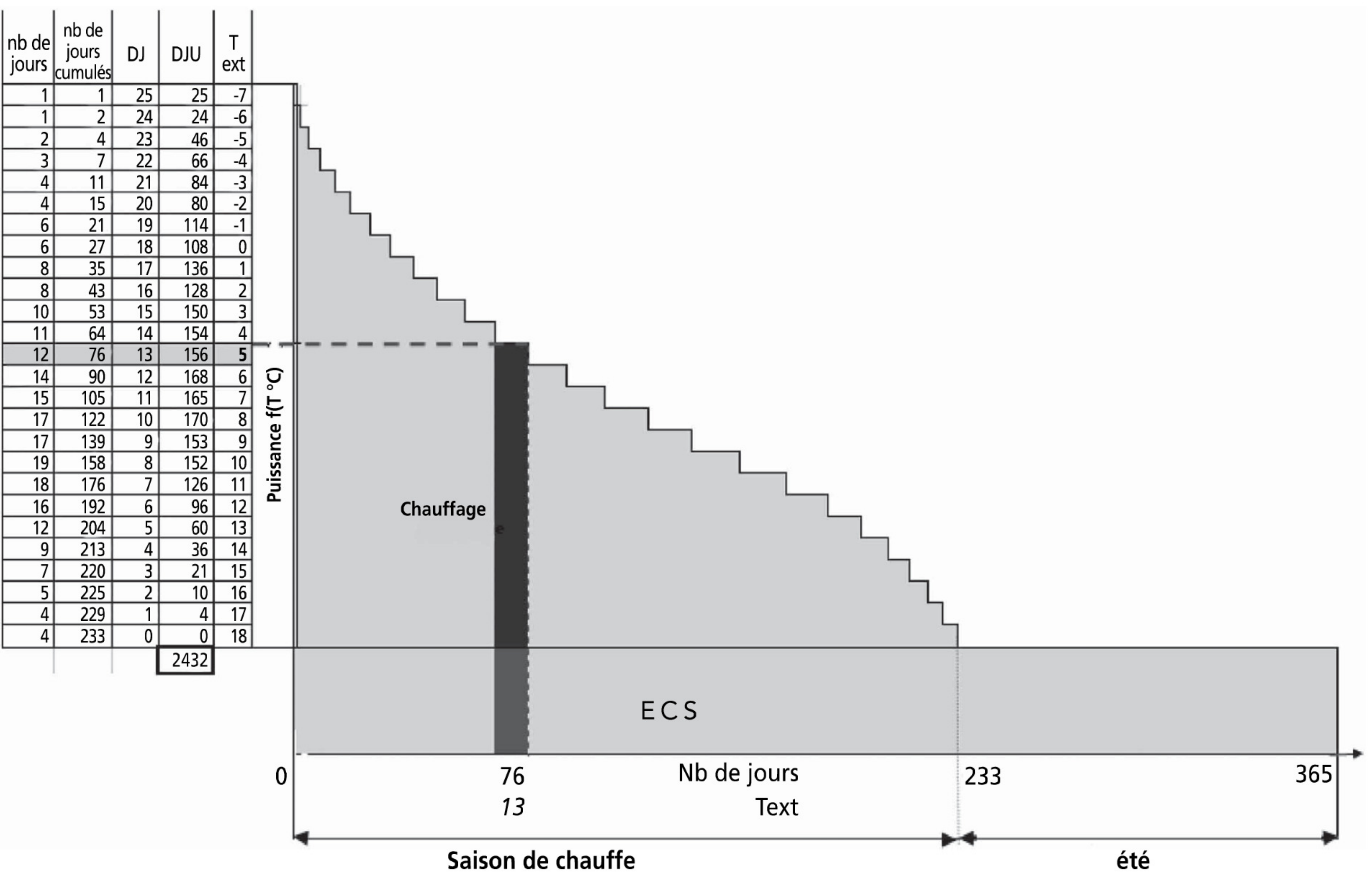
Les DJU sont généralement calculés sur la base d'une *Tnc = 18 °C* :

$$DJU = \Sigma\ Ni\ (Tei - Teb)$$

- Tei = Température extérieure entre Teb et Tnc ;
- Nei = Nombre de jours d'apparition de la température extérieure dans l'année.

La visualisation des consommations sur une période de chauffage peut se faire à partir de la courbe dite « courbe monotone » (*figure 5.6*).

Copyright © 2014 Dunod.



nb de jours	nb de jours cumulés	DJ	DJU	T ext
1	1	25	25	-7
1	2	24	24	-6
2	4	23	46	-5
3	7	22	66	-4
4	11	21	84	-3
4	15	20	80	-2
6	21	19	114	-1
6	27	18	108	0
8	35	17	136	1
8	43	16	128	2
10	53	15	150	3
11	64	14	154	4
12	76	13	156	**5**
14	90	12	168	6
15	105	11	165	7
17	122	10	170	8
17	139	9	153	9
19	158	8	152	10
18	176	7	126	11
16	192	6	96	12
12	204	5	60	13
9	213	4	36	14
7	220	3	21	15
5	225	2	10	16
4	229	1	4	17
4	233	0	0	18
			2432	

Figure 5.6 – Courbe monotone des besoins de chauffage + ECS

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

Pour chaque température extérieure, en commençant par la plus basse, selon la zone climatique (Teb = –7 °C dans l'exemple), on trace un rectangle dont la hauteur est proportionnelle à (Teb – Tnc) dans l'exemple (18 – (–7)) = 25 et de base égale au nombre de jours d'apparition de cette température. Pour une température moyenne de 5 °C, la météo indique un nombre de jours d'apparition de 12, le rectangle a une hauteur proportionnelle à la puissance (5 – (–7)) = 12. Chaque rectangle représente le nombre de DJU.

La surface de la courbe ainsi tracée est proportionnelle à la consommation pour une saison de chauffage.

Les besoins utiles de chauffage sont donnés par la formule :

$$\textbf{(Bch)} = \textbf{G} \times \textbf{V} \times \textbf{DJU} \times \textbf{24 en Wh}$$

Tableau 5.2 – Quelques valeurs de DJU_{18}

	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
Ajaccio	299	249	242	182	80	11	0	0	5	63	168	260	**1559**
Bordeaux	380	303	276	207	123	41	0	0	45	139	284	356	**2154**
Lille	467	409	372	290	184	96	0	0	105	218	352	445	**2938**
Lyon	471	369	327	234	124	39	0	0	62	192	347	460	**2625**
Paris	450	388	338	244	125	61	0	0	76	198	345	432	**2657**
Marseille	360	276	240	158	49	4	0	0	7	97	221	323	**1735**
Brest	363	332	326	276	202	117	0	0	102	183	278	336	**2515**

Une formule approchée donne les DJU à partir de la température de base hiver :

$$DJU_{18} = -100{,}51 \text{ teb} + 1\,704$$

La consommation d'énergie va dépendre :

- des moyens de production (type de chaudière, PAC) et donc des rendements ;
- des pertes de distribution ;
- du mode d'utilisation du bâtiment (intermittence, ralenti de nuit). La gestion de l'intermittence a une grande influence sur les consommations d'énergie, par exemple pour les équipements scolaires.

Copyright © 2014 Dunod.

La puissance nécessaire à la fourniture d'ECS est supposée constante sur l'année (ce qui n'est évidemment pas le cas dans la réalité).

5.2.3 Consommation (Wh) = Bch × I / rdt production × rdt de distribution

I = Intermittence du bâtiment

- **Faible = I > 0,9** : hôpital, maison de retraite, piscine, logements collectifs ;
- **Moyenne = 0,6 < I < 0,9** : logements collectifs, établissements scolaires avec internat, bâtiments communaux ;
- **Forte = I < 0,6** : groupes scolaires, collèges, lycées, salles des fêtes, gymnases, bâtiments industriels.

Exemple :

Groupe scolaire région parisienne :

- S : 2 000 m^2 ; G = 0,9 ; DJU : 2 400 ; Intermittence 0,7
- Si chauffage gaz : rdt production = 0,9
- Si PAC eau/eau : COP = 3,5
- Rendement de distribution : 0,9
- Consommation solution gaz : 250 MWh
- Consommation solution PAC : 64 MWh électrique (165 kWhep*)

*kWhep : kWh énergie primaire (1 kWh élec = 2,58 kWhep).

5.3 Consommation eau chaude sanitaire

La consommation d'ECS dans l'habitat dépend de nombreux paramètres, un des plus importants réside dans les habitudes de vie des habitants. Elle peut donc varier de manière importante ; les recettes pour réduire la consommation d'eau chaude existent (douches plutôt que bains, douchettes, mousseurs…)

Lorsque l'on ne dispose pas de données mesurées sur les consommations réelles d'eau chaude sanitaire, les besoins journaliers peuvent être estimés sur la base des quantités d'eau nécessaires pour les principaux usages.

Une consommation journalière de l'ordre de 35 à 50 litres par personne peut être une base indicative pour le dimensionnement de l'installation dans l'habitat.

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

Elle peut être beaucoup plus importante pour certains équipements (100 à 300 l/lit/jour pour un hôpital).

La consommation d'énergie pour l'eau chaude sanitaire devient le poste le plus important dans les nouvelles constructions, avant le chauffage.

La *figure 5.7* représente la répartition des besoins énergétiques d'un habitat (BBC) tel que le prévoit la réglementation thermique 2012 sur la base de 50 kWhep/m². On constate que l'ECS représente environ la moitié des besoins d'énergie de la maison.

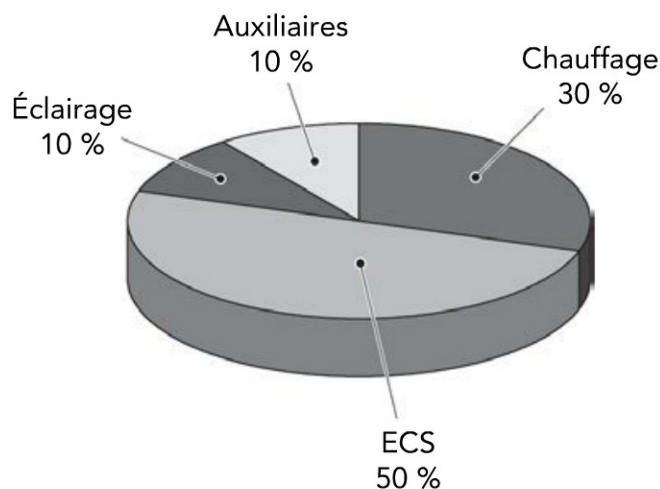


Figure 5.7 – Répartition consommation énergétique (habitat BBC)

Le recours à des énergies renouvelables, comme le solaire ou l'ECS thermodynamique, sera donc un passage obligé pour répondre aux exigences fixées par le label BBC et la nouvelle réglementation (RT 2012).

5.3.1 Détermination des besoins énergétiques pour produire l'ECS

Pour se prémunir contre les proliférations de micro-organismes (comme les légionelles), il est nécessaire de porter l'eau du ballon à une température supérieure ou égale à 60 °C pendant 4 à 5 minutes.

Plus l'eau prélevée dans le réseau est froide, plus il faudra d'énergie pour la porter à une température donnée. La température de l'eau froide dépend à la fois de la situation géographique et de la saison (voir *tableau 5.3*).

On peut déterminer les besoins énergétiques journaliers d'ECS : Bj en kWh/jour par la relation :

$$Bj = 1{,}16 \cdot Vj \cdot \Delta T$$

Copyright © 2014 Dunod.

ΔT est la différence de température moyenne entre l'eau chaude délivrée aux usagers et l'eau froide du réseau.

Vj est le volume journalier moyen d'ECS en m^3 (à mesurer ou à évaluer).

1, 16 est la chaleur spécifique de l'eau exprimée en $kWh/m^3 \cdot °C$.

Tableau 5.3 – Température mensuelle de l'eau du réseau de quelques villes

	Latitude	Janv	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Moyenne
Bastia	42 ,55°	12	12	13	14	16	18	19	19	18	16	14	12	15,25
Nice	43,65°	12	12	13	14	16	18	19	19	18	16	14	12	15,25
Bordeaux	44,80°	8,9	9,3	11	12	14	15	16	16	15	13	11	9,2	12,53
Grenoble	45,40°	6,2	7,1	9,3	11	13	14	16	15	14	11	8,7	6,6	10,99
Lyon	45,70°	6,9	7,6	9,7	11	13	15	16	16	14	12	9,2	7,4	11,48
Brest	48,45°	8,5	8,4	9,5	10	11	13	13	14	13	11	9,9	8,9	10,85
Strasbourg	48,55°	5,3	5,8	7,7	9,5	11	13	14	14	12	9,8	7,5	5,8	9,62
Paris (Le Bourget)	48,97°	7	7,4	9,1	11	13	14	15	15	13	11	8,9	7,5	10,99
Lille	50,55°	6,2	6,5	8,1	9,5	11	13	14	14	13	10	8,1	6,7	10.01

La consommation d'énergie nécessaire à la fourniture d'ECS sera affectée par le rendement de production et par le rendement de distribution. Ce dernier sera fonction du système adopté.

Il existe différents modes de production d'ECS :

- production instantanée ;
- production semi-instantanée ;
- production semi-accumulation ;
- production en accumulation.

En ce qui concerne la puissance à affecter pour la fourniture d'ECS selon les systèmes évoqués ci-dessus, il faudra éventuellement prévoir une surpuissance pour la relance concernant les consommations de pointe (*figure 5.8*).

Besoins annuels = Bch + Becs

Consommation d'énergie totale = (Bch/rdt *ch* + Becs/rdt*ecs*)

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

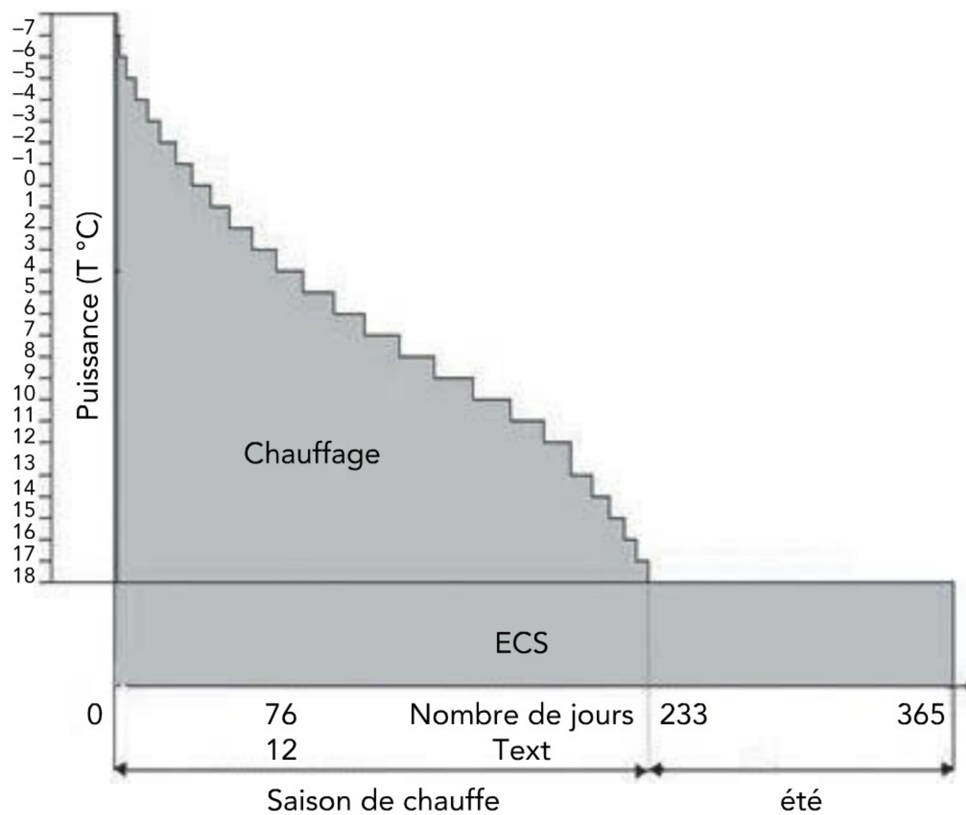


Figure 5.8 – Courbe monotone chauffage + ECS

5.4 Détermination des besoins pour climatisation (besoins de froid)

Pour calculer et dimensionner une installation de climatisation, il s'agit d'évaluer les apports thermiques dans le volume à climatiser, à savoir :

- les apports par transmission au travers des parois ;
- les apports par rayonnement solaire des parois vitrées ;
- les apports par renouvellement d'air ;
- les apports internes concernant à la fois les personnes et les appareils électriques.

Il existe plusieurs méthodes pour effectuer un bilan de climatisation, notamment celles des constructeurs de matériels Airwell et Aldes. Le lecteur pourra se reporter utilement à l'ouvrage *Aide-mémoire Génie climatique* de Jean Desmons paru aux éditions Dunod. Il existe également des logiciels spécialisés : Projiciclim 1 et 2.

À titre indicatif, la puissance à mettre en œuvre pour des commerces fortement éclairés à forte occupation peut aller jusqu'à 250 W/m^2.

Copyright © 2014 Dunod.

Pour une maison individuelle, la puissance frigorifique à mettre en œuvre sera fonction de la qualité de l'isolation et des protections solaires.

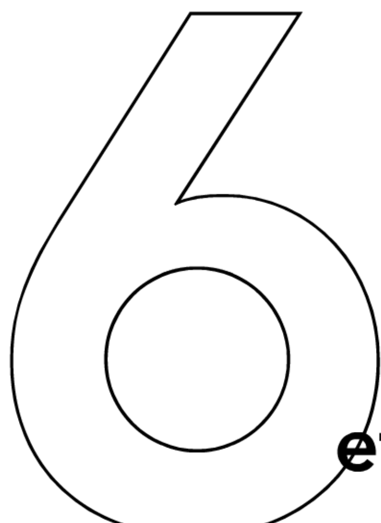
Pour faire chuter la température de 4 à 5 °C, la puissance nécessaire est de l'ordre de 60 W/m^2.

À noter qu'il existe des solutions écologiques et économiques pour rafraîchir une habitation en été :

- le puis canadien qui utilise l'inertie du sous-sol à une profondeur de l'ordre de 2 m ;
- la surventilation nocturne ;
- le *geocooling* (*cf. chapitre 9.2.9*) pour les pompes à chaleur sur aquifère.

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

Copyright © 2014 Dunod.



Systèmes d'émission de chauffage et/ou de rafraîchissement

Le milieu à chauffer constituant la source chaude devra être compatible avec les contraintes imposées par la thermodynamique. La recherche d'un système d'émission de chaleur à basse température devra être la préoccupation des concepteurs de ces installations. Pour le chauffage des habitations, le chauffage par plancher chauffant (rafraîchissant) est une solution bien adaptée à l'utilisation de la pompe à chaleur. Pour les ensembles tertiaires nécessitant de grands volumes de renouvellement d'air, le choix portera sur des ventilos-convecteurs ou centrales de traitement d'air adaptées.

La nature des installations terminales de chauffage et/ou rafraîchissement sera déterminante sur les performances du système. En effet, d'une part, les pompes à chaleur usuelles sont conçues pour fournir au condenseur une température qui n'excède pas 60 °C, d'autre part, la performance est dictée par l'écart de température entre source froide et source chaude (*paragraphe 3.4.1*).

Les systèmes d'émission de chaleur ou de froid peuvent être alimentés en mode hydraulique ou en mode aéraulique.

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

6.1 Émission en mode hydraulique

En mode hydraulique, le fluide caloporteur est de l'eau. Nous examinerons ultérieurement le cas où l'émission se fait directement par le fluide frigorigène de la pompe à chaleur (détente directe).

Les techniques classiques sont soit des radiateurs, soit des planchers chauffants/rafraîchissants, voire des plafonds chauffants/rafraîchissants.

La loi de régulation fixera les performances du système selon que l'on utilise des radiateurs ou des planchers chauffants.

6.1.1 Radiateurs à eau chaude

Les radiateurs à eau chaude sont réalisés à partir de 3 matériaux principaux : la fonte, l'acier ou l'aluminium. Leur conception doit permettre la plus grande surface d'échange par le biais de tubes, lames ou ailettes.

La chaleur émise par un radiateur se diffuse dans l'espace à chauffer par rayonnement et par convection. Placé près d'un mur extérieur, une partie de la chaleur sera perdue par conduction au travers de la paroi.

La puissance d'un radiateur est caractérisée par sa surface et sa loi de régulation en fonction de la température extérieure. Les constructeurs spécifient la puissance d'un radiateur pour un écart entre la température moyenne du radiateur et la température ambiante du milieu à chauffer. Elle est généralement donnée pour un ΔT donné (*figure 6.1*). Selon la norme européenne EN 442, un radiateur est dimensionné en régime 75/65, soit un ΔT de 50 °C. L'ancienne norme NF P 52011 dimensionnait sur un ΔT de 60 °C.

Pour assurer les besoins de chauffage d'une pièce à 20 °C, la température d'entrée du radiateur étant de 90 °C et la sortie de 70 °C, le ΔT est de [(90 – 70) / 2 – 20], soit 60.

Si le radiateur est alimenté par de l'eau à 45 °C et a une sortie à 35 °C, le ΔT est de (40 – 20), soit 20.

Pour assurer la même puissance, il faudra un radiateur trois fois plus grand dans le deuxième cas.

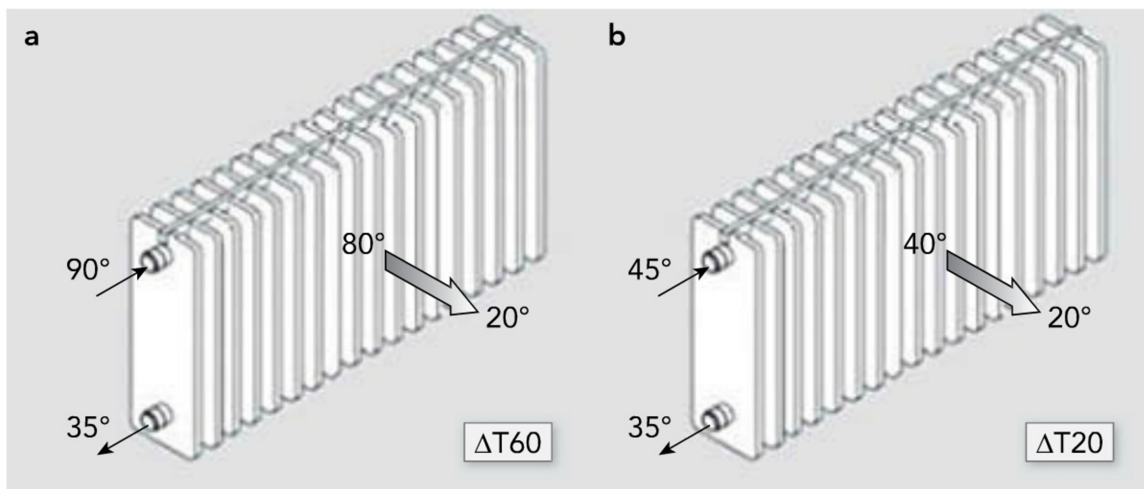


Figure 6.1 – Caractéristiques des radiateurs à eau chaude

Copyright © 2014 Dunod.

On désigne par radiateur à chaleur douce un radiateur qui fonctionne avec un ΔT inférieur à 50.

Pour définir sa puissance Pe en fonction de son ΔT, on applique la formule ci-dessous :

$$Pe = Dep / (((Td - Tr) / \ln(Td - Ti) / (Tr - Ti)) / \Delta Tn)^{n}$$

Dep : déperditions

Td : température de départ

Tr : température de retour

Ti : température ambiante

ΔTn : 50

n : 1,287

Cas d'installation d'une PAC sur un bâtiment existant

Prenons, par exemple, un bâtiment existant équipé de radiateurs 90/70, alimentés par une chaudière fioul ou gaz. Si on veut l'équiper d'une pompe à chaleur standard fournissant de l'eau à 50 °C, plusieurs solutions peuvent être envisagées :

- On diminue les besoins du bâtiment par une rénovation avec une isolation performante (exemple : *tableau 6.1*).
- On ne modifie pas les radiateurs et on fonctionne en système bivalent, à savoir que la pompe à chaleur est en service tant que la température extérieure est supérieure à 4 °C (*figure 6.2*). En dessous de 4 °C, l'intervention d'un système d'appoint est nécessaire et en dessous de 0 °C, la relève est totalement assurée par une chaudière classique (existante ou à créer).
- Les radiateurs « haute température » 90/70 sont remplacés par des radiateurs « basse température » 45/35 nécessitant une surface d'émission beaucoup plus grande. Dans ces conditions, la pompe à chaleur est à même d'assurer la totalité des besoins pour un climat type région parisienne.
- Une autre solution peut consister à utiliser une PAC haute température dont il existe 2 technologies possibles : PAC avec 2 compresseurs ou système EVI (*Enhanced Vapour Injection* en anglais, réinjection de fluide en français).

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

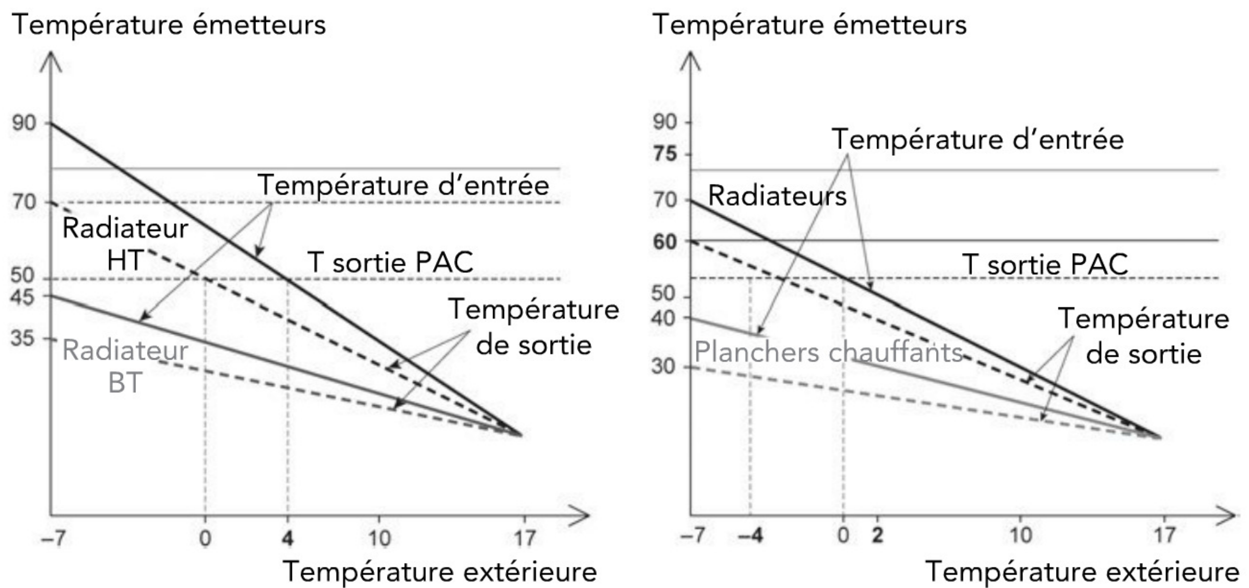


Figure 6.2 – Lois de régulation radiateurs

Considérons une pièce de 30 m², de hauteur 2,5 et avec une température de chauffage 20 °C.

Tableau 6.1 – Besoins du bâtiment avant/après une isolation performante

	Situation avant rénovation	Après rénovation
Coefficient de déperdition volumique G (W/m³)	1,6	0,5
Puissance nécessaire W	3 000	937,5
Loi de régulation/Δ**T**	90/70 – **60**	45/35 – **20**

Une isolation importante permet de conserver les émetteurs. Les autres avantages consistent en :

- une diminution du débit dans les radiateurs, donc des pertes de charge ;
- une diminution des pertes thermiques dans les canalisations et au niveau des émetteurs adossés aux murs extérieurs ;
- un meilleur confort pour les occupants.

Important

En principe, un radiateur ne peut assurer la fonction de rafraîchissement. Il ne peut pas non plus fonctionner selon le principe de détente directe.

Copyright © 2014 Dunod.

6.1.2 Plancher chauffant-rafraîchissant

Les planchers chauffants, compte tenu de leur grande surface d'émission, sont bien adaptés à un chauffage par pompe à chaleur. La puissance maximale dissipée par un plancher chauffant est de l'ordre de 90 à 100 W/m², ce qui ne pose pas de problème pour une maison moyennement isolée (G < 1,5 W/m³.°C).

La réversibilité, moyennant certaines précautions (risques de condensation), peut être envisagée. En mode chauffage, la température de l'eau circulant dans la dalle doit être inférieure à 40 °C. En matière de rafraîchissement, la puissance maximale dissipée par un plancher est de l'ordre de 35 W/m². Cette puissance permet un abaissement de température de 4 à 5 °C, ce qui est très souvent suffisant pour ressentir une sensation de confort pendant les périodes les plus chaudes.

L'abaissement de température du sol peut induire, dans certains cas, l'apparition de phénomène de condensation. La condensation se produit lorsque l'air de la pièce au contact du sol descend au-dessous de la température dite de « rosée ».

Cette température peut être déterminée à partir du diagramme psychrométrique, dit aussi diagramme d'air humide, illustré sur la *figure 6.3*.

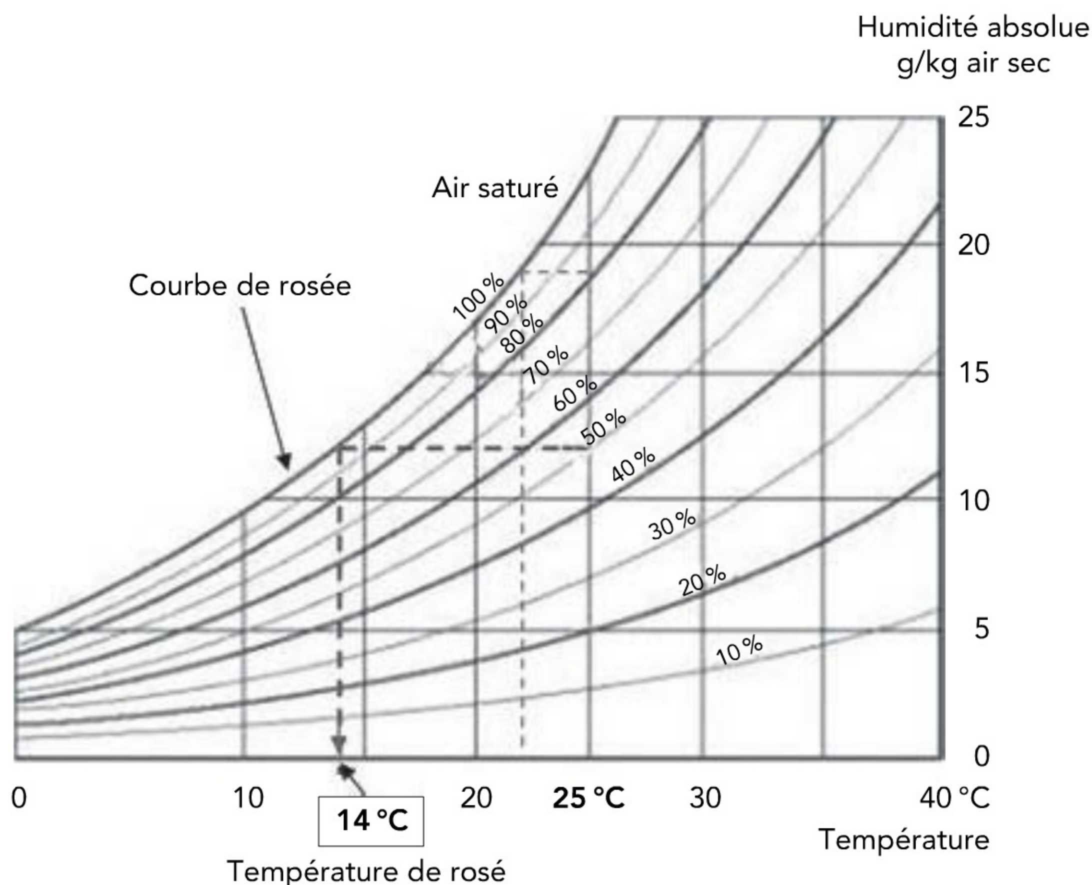


Figure 6.3 – Diagrame d'air humide

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

Exemple : Pour un local dont la température est de 25 °C et l'humidité relative de 50 %, la condensation apparaîtra lorsqu'il y aura contact avec une surface froide inférieure à 14 °C. En mode refroidissement, la température du fluide caloporteur devra être régulée pour faire en sorte que la température de la surface du sol soit inférieure à la température de rosée.

Plus la teneur en eau est élevée, plus le point de rosée est élevé. Dans notre exemple, pour une humidité relative de 80 %, le point de rosée se situerait autour de 22 °C.

Les planchers rayonnants hydrauliques présentent un certain nombre d'avantages par rapport aux systèmes aérauliques : meilleur confort, absence de courants d'air et de bruit et possibilité d'utilisation directe de la nappe d'eau souterraine pour le rafraîchissement (*geocooling*).

Le plancher chauffant-rafraîchissant est constitué par un réseau de tubes généralement en polyéthylène réticulé (PER) de diamètre 16 mm, noyés dans une dalle d'enrobage. Le mode de pose est fixé par les DTU (documents techniques unifiés).

La résistance thermique au-dessus du sol ne doit pas dépasser 0,13 $m^2 \cdot K/W$. Le revêtement de sol doit être choisi en fonction de sa résistance thermique. Les revêtements conseillés sont les carreaux céramiques, les dalles de pierre. Les moquettes et parquets flottants sont à déconseiller.

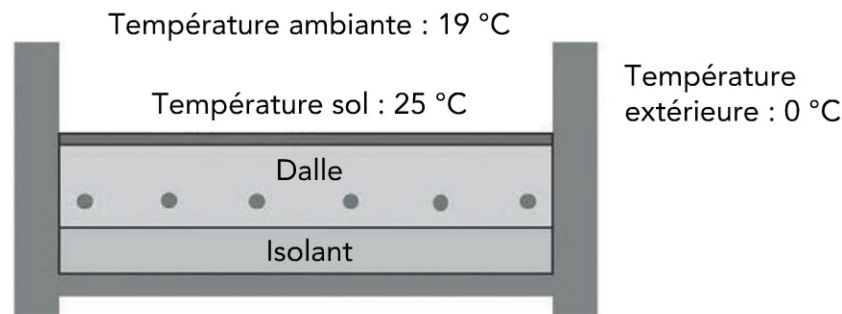


Figure 6.4 – Plancher en mode chauffage

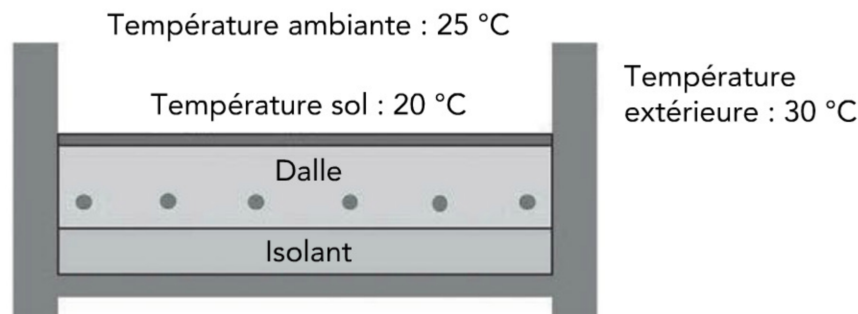


Figure 6.5 – Plancher en mode rafraîchissement

Copyright © 2014 Dunod.

Le cahier des prescriptions techniques établi par le CSTB précise les valeurs de la résistance thermique de l'isolation sous les tubes *(tableau 6.2).*

Tableau 6.2 – Valeurs de la résistance thermique de l'isolation sous les tubes (sources : COSTIC)

Local sous-jacent	Pièces chauffées	Terre-plein	Temp. ext. min. – 5 °C	Temp. ext. min. – 15 °C
Résistance thermique ($m^2 \cdot K/W$)	0,75	1,00	1,50	2,00

En mode froid, un dispositif de sécurité doit couper impérativement la fourniture de froid au niveau du plancher si la température descend.

La pose peut se faire en colimaçon (*figure 6.7*), ou en serpentin (*figure 6.6*), avec un pas qui peut varier entre 10 et 30 cm. Il peut être plus resserré en zone de plus fortes déperditions.

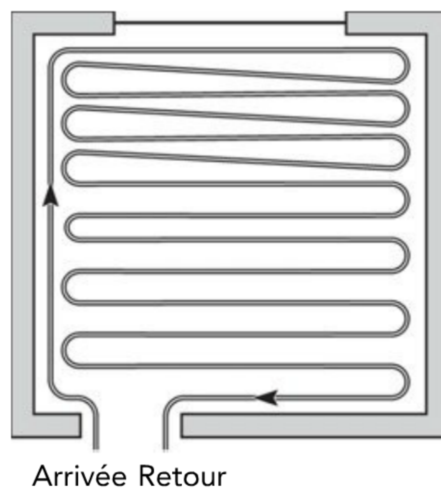


Figure 6.6 – Pose en serpentin

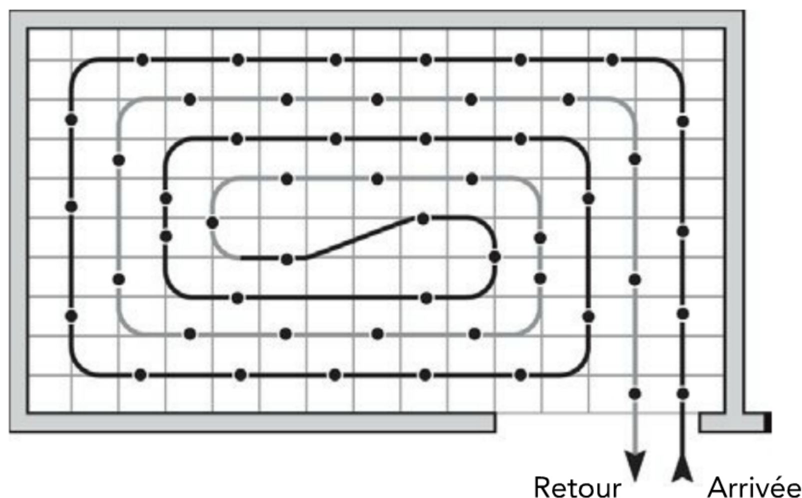


Figure 6.7 – Pose en colimaçon

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

En mode chauffage, la température de l'eau circulant dans les tubes est de 30 à 40 °C. Pour des raisons physiologiques, la réglementation fixe la limite de la température du sol à 28 °C (DTU 65,8). Les techniques utilisées aujourd'hui n'ont rien à voir avec les systèmes de chauffage par le sol des bâtiments des années 1960 de mauvaise réputation (problème de lourdeur de jambes).

Dans le cas d'une PAC à détente directe où le fluide frigorigène circule dans le plancher, il ne sera pas possible d'assurer le rafraîchissement par le sol. Il n'est également pas possible d'inclure un système d'appoint dans le circuit et la régulation pièce par pièce est délicate.

Plafond rafraîchissant

Il existe plusieurs techniques adaptées aux plafonds :

- Nattes de tubes en matière synthétique : il s'agit de tubes de faible diamètre (2 mm) disposés sur un parement métallique et recouverts d'une couche d'isolant limitant les échanges thermiques vers le haut. Ce système peut être réversible et utilisé en chauffage comme en refroidissement. En froid, la puissance surfacique peut être de l'ordre de 70 W/m².
- Dalle active : c'est le même principe que le plancher chauffant-rafraîchissant avec les mêmes avantages et inconvénients, notamment vis-à-vis des phénomènes de condensation.

6.2 Émission en mode aéraulique

6.2.1 Principales propriétés physiques de l'air

- *Température sèche* : température mesurée par un thermomètre dit « sec ».
- *Température humide* : température obtenue en entourant l'élément sensible d'un thermomètre d'une ouate imprégnée d'eau et sous l'effet d'un courant d'air.
- *Température de rosée* ou point de rosée (paragraphe plancher rafraîchissant).
- *Humidité relative ou hygrométrie relative* : rapport de la masse de la vapeur d'eau contenue dans un kilogramme d'air sec à la masse de la vapeur d'eau contenue dans ce même kilogramme d'air saturé à la même température. En termes de confort, le taux d'humidité relative idéal se situe donc entre 30 % et 70 %.
- *Humidité absolue ou teneur en eau* : masse de vapeur contenue dans l'air par kg d'air sec.
- *Enthalpie* : énergie thermique exprimée en kJ/kg d'air.

Copyright © 2014 Dunod.

Le **diagramme de l'air humide** (*figure 6.8*) permet de déterminer graphiquement, avec une assez bonne précision, toutes les caractéristiques de l'air en connaissant au moins 2 d'entre elles.

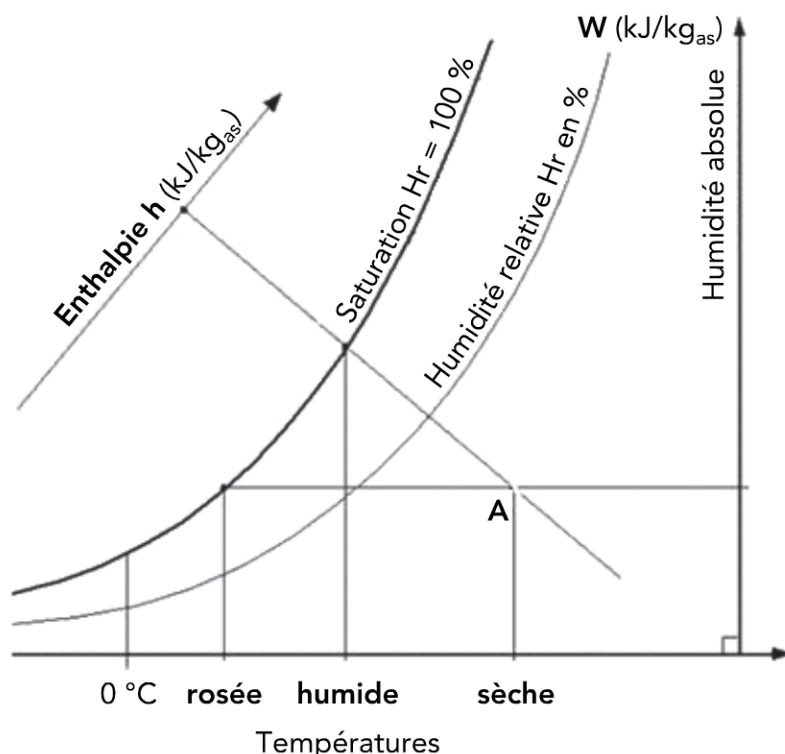


Figure 6.8 – Diagrame de l'air humide

6.2.2 Ventilos-convecteurs

En mode aéraulique, le système le plus couramment utilisé est le ventilo-convecteur. En mode chauffage, le principe consiste à souffler de l'air sur un convecteur parcouru par de l'eau chaude (ou eau glacée) à l'aide d'un ventilateur. Très utilisé dans le secteur tertiaire (notamment dans les bureaux), il présente l'avantage à la fois de permettre la ventilation, le filtrage de l'air et d'assurer un renouvellement précis et simple. La conception de ce système doit faire l'objet d'une attention particulière pour éviter les inconvénients souvent attachés à ce genre de système (courant d'air, niveau acoustique élevé, sensation de trop chaud ou trop froid…). Les systèmes anciens ont un régime d'eau à température élevée (80/60 °C), mais il est possible de concevoir aujourd'hui des systèmes avec des températures plus basses (45/40 °C) compatibles avec une pompe à chaleur, mais nécessitant des appareils de taille plus importante.

Un ventilo-convecteur est un appareil de traitement d'air qui assure le chauffage et/ou le refroidissement de l'air qui le traverse ainsi que sa filtration.

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

L'énergie thermique est apportée au ventilo-convecteur par un fluide (eau ou fluide frigorigène). Lorsque le fluide caloporteur est le fluide frigorigène, le système est dit à détente directe. Ce fluide chaud ou froid provient, soit d'une pompe à chaleur réversible, soit d'un groupe froid associé à une résistance électrique ou d'une chaudière.

Un ventilo-convecteur aspire l'air dans la pièce où il est installé et le fait passer dans un ou plusieurs filtres. L'air traverse ensuite un échangeur thermique, alimenté en chaleur ou en froid. L'air réchauffé ou refroidi est ensuite restitué dans le local.

Dans le système à détente directe, le fluide frigorigène se condense ou s'évapore selon que la pompe à chaleur est utilisée en chauffage ou en climatisation dans l'échangeur thermique, ceci permettant un transfert rapide de l'énergie thermique du fluide à l'air aspiré par l'appareil. Après changement d'état, le fluide frigorigène revient au module extérieur de la pompe à chaleur pour un nouveau cycle.

Un ventilo-convecteur est constitué d'une carrosserie au sein de laquelle sont disposées les batteries d'échange (eau chaude et/ou eau froide) traversées par l'air soufflé par un ventilateur. Le système doit être également équipé de filtres et d'un bac de récupération de condensats.

On distingue différents types de ventilo-convecteurs :

Ventilo-convecteur 2 tubes

Il est équipé d'un seul échangeur, alimenté alternativement par un fluide chaud l'hiver, et un fluide froid pour le rafraîchissement en été.

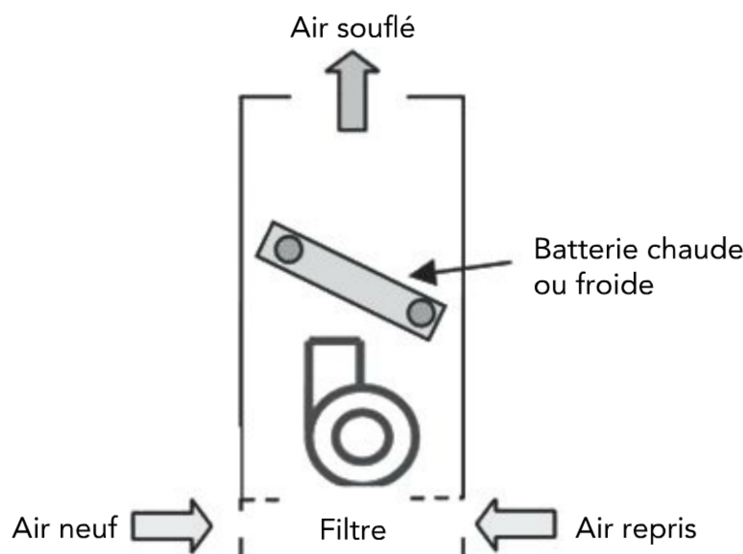


Figure 6.9 – Ventilo-convecteur 2 tubes

Copyright © 2014 Dunod.

Cette configuration avec la même batterie d'échange pour le froid et pour le chaud n'est pas la mieux adaptée si les besoins thermiques sont différents au sein du bâtiment. Le basculement du chaud vers le froid, et réciproquement, peut se faire de manière manuelle.

Ventilo-convecteur 2 tubes 2 fils

Il existe 2 types de ventilo-convecteurs « 2 tubes 2 fils » :

Système non réversible

Le ventilo-convecteur ne dispose que d'une seule batterie alimentée en froid fournie par un groupe frigorifique. Le chauffage est assuré par soufflage d'air au travers d'une résistance électrique. Lorsque la résistance électrique fonctionne, la batterie froide n'est pas alimentée.

La réversibilité du groupe n'est pas utilisée. Ce système est concevable pour les bâtiments ayant des besoins de froid importants et tout au long de l'année.

Système réversible

La batterie peut être alimentée, soit par un fluide froid, soit par un fluide chaud. La résistance électrique n'intervient que lorsque la puissance apportée par la batterie chaude est insuffisante. Cette configuration convient pour des besoins de chauffage élevés en hiver sans besoin de rafraîchissement sur cette période.

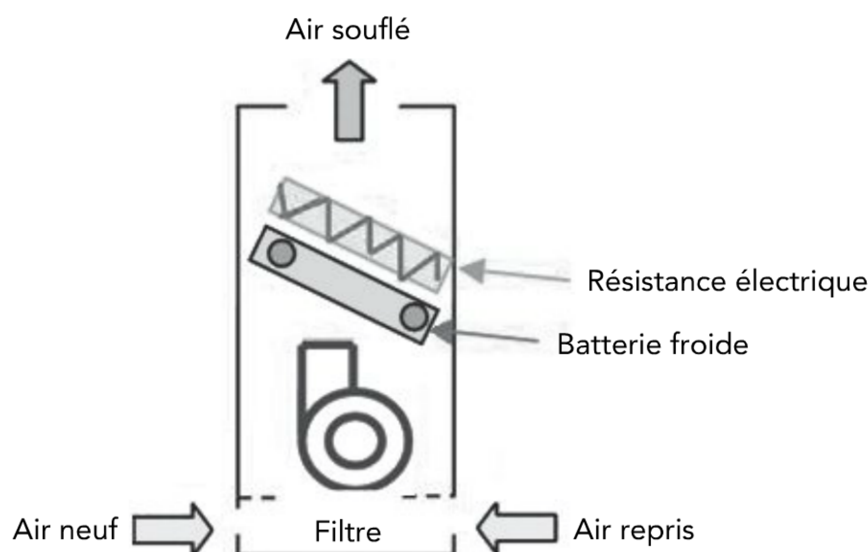


Figure 6.10 – Ventilo-convecteur 2 tubes 2 fils

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

Ventilo-convecteur 4 tubes

Le ventilo-convecteur est équipé de 2 batteries d'échange. L'une est alimentée par le fluide chaud lorsqu'il y a besoin de chauffage, l'autre en froid pour assurer le rafraîchissement. Ce système permet d'assurer les conditions de confort dans toutes les configurations envisageables dans le bâtiment.

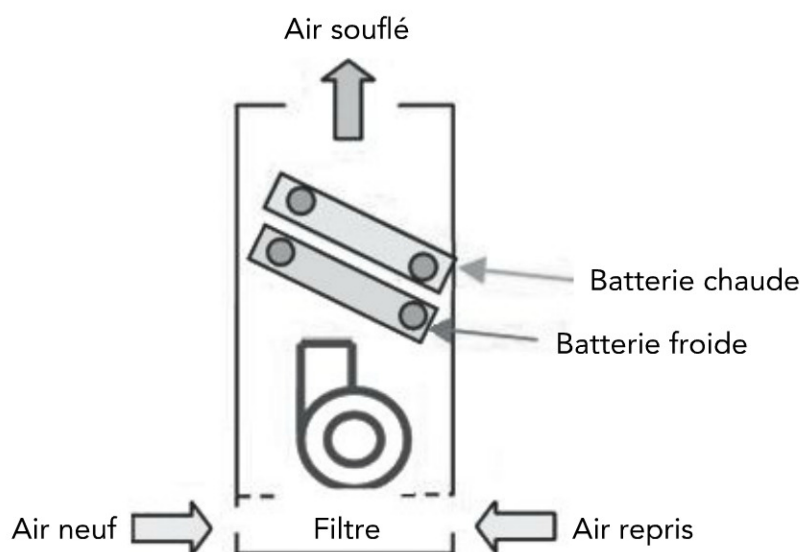


Figure 6.11 – Ventilo-convecteur 4 tubes

6.2.3 Autres systèmes

Plafond à ailettes clipsables

Ce plafond est composé d'un circuit hydraulique constitué d'une grille de tuyaux en cuivre ou en acier raccordés à chaque extrémité à un collecteur.

Poutres froides à induction

La poutre froide est un appareil de conditionnement d'air qui assure les trois fonctions, refroidissement, chauffage, ventilation.

Les poutres froides (*figure 6.12*) sont constituées d'une batterie à ailettes implantée dans un caisson dans lequel circule le débit d'air neuf. La diffusion d'air neuf dans le local se fait par des orifices répartis de part et d'autre du caisson. L'air ambiant est entraîné par induction sur la batterie froide (ou chaude). La puissance surfacique de refroidissement est de l'ordre de 100 W/m².

Copyright © 2014 Dunod.

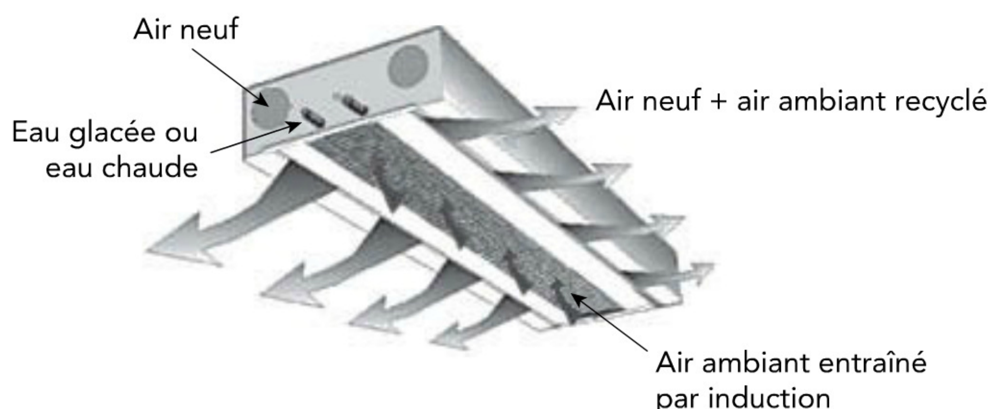


Figure 6.12 – Poutre froide

Plafond rayonnant dynamique

L'air neuf, préchauffé ou refroidi par la centrale thermodynamique (selon la saison), est soufflé dans un volume aménagé au-dessus de chaque pièce de vie. Les échanges par rayonnement sont privilégiés pour chauffer ou refroidir le logement. Des éléments chauffants d'appoint (*figure 6.13*) sont dissimulés au-dessus du plafond. Leur mise en route se commande pièce par pièce.

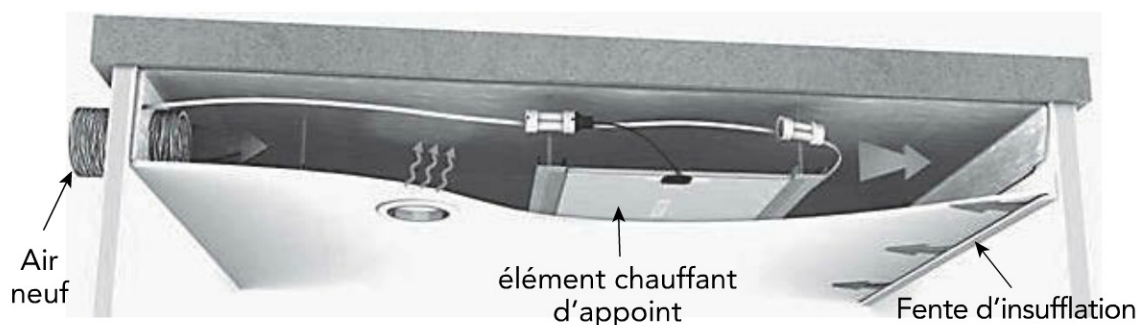


Figure 6.13 – Plénum dynamique (source : Hora)

6.2.4 Centrales de traitement d'air CTA

Il s'agit d'un système centralisé de distribution, constitué par un ou plusieurs caissons de préparation, disposés en batterie dans le local technique.

Les principaux éléments constitutifs de la CTA (*figure 6.14*) sont :

- une batterie chaude ;
- une batterie froide à eau glacée ou à détente directe ;
- une prise d'air neuf ;
- un caisson de mélange ;
- un filtre ;

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

- un ventilateur centrifuge ;
- un départ pour le soufflage ;
- un retour pour la reprise d’air intérieur ;
- un système de régulation.

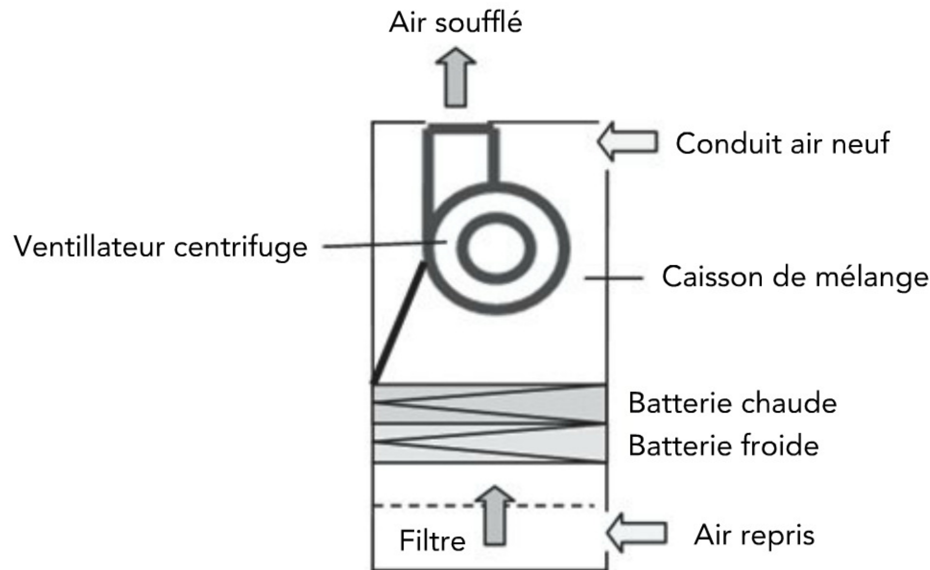


Figure 6.14 – Schéma simplifié d’une CTA

L’air traité est distribué par des gaines qui alimentent les diffuseurs d’air dans les locaux. On rencontre 3 configurations : débit constant, débit variable et double conduit.

Dans le système à débit variable, l’air distribué dans les locaux est à la même température. La régulation dans les différentes zones s’effectue par ajustement du débit en fonction des besoins calorifiques ou frigorifiques. Le débit d’air globalement distribué est moins important que dans la solution débit constant et donc plus économe en énergie électrique (ventilateur).

Dans la configuration à double conduit, les boîtes de mélange situées dans les locaux sont raccordées à un conduit d’air froid et à un conduit d’air chaud. La régulation au niveau de la boîte de mélange est assurée par un thermostat d’ambiance en fonction des besoins.

Au sein de ces technologies, on distingue les systèmes à 2 tubes et les systèmes à 3 tubes. Dans les systèmes à 2 tubes, toutes les unités intérieures sont raccordées à un même groupe extérieur qui fonctionne soit en chauffage, soit en refroidissement. Dans le système à 3 tubes, les unités intérieures sont indépendantes les unes des autres. Ce système est adapté pour le chauffage et la climatisation de plusieurs locaux aux besoins énergétiques différents. Comme illustré dans

Copyright © 2014 Dunod.

la *figure 6.15*, de manière simultanée, certaines unités fonctionnent en refroidissement, d'autres en mode chauffage. Le troisième tube permet un transfert thermique entre les locaux ayant besoin de chauffage et ceux ayant besoin de refroidissement. Ces transferts d'énergie lorsque les besoins sont bien différenciés permettent d'obtenir des coefficients de performance élevés.

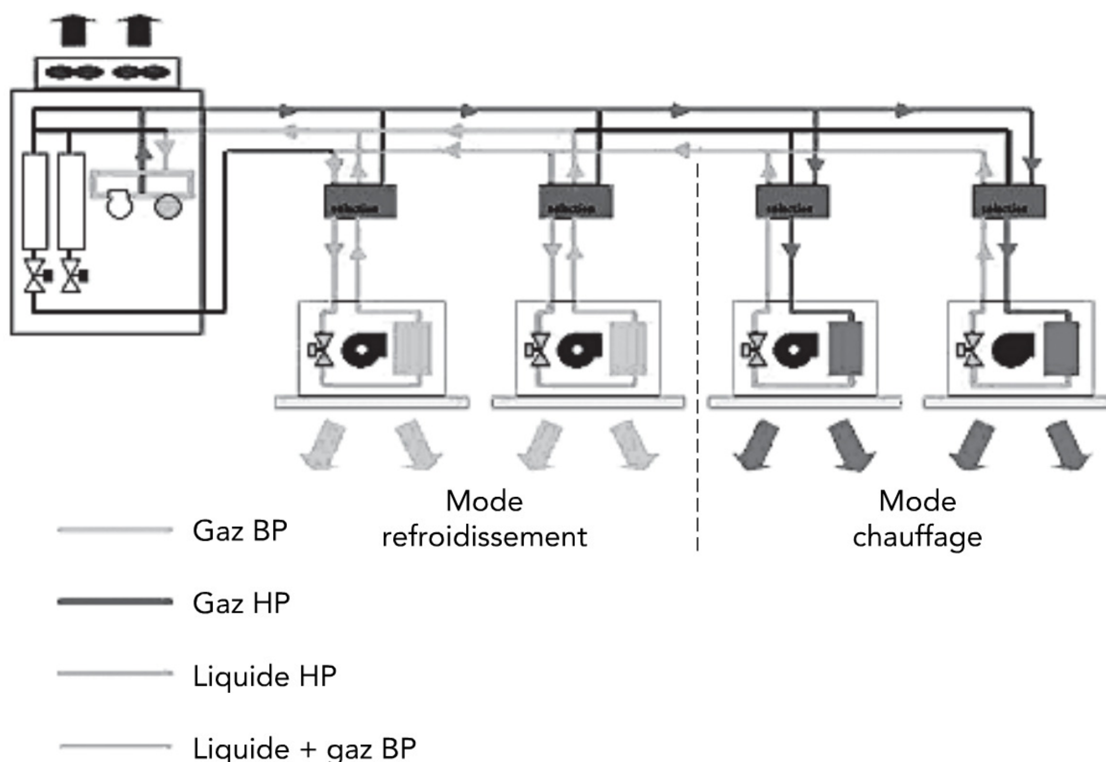


Figure 6.15 – Schéma de principe d'une installation VRV Inverter 3 tubes (source Daikin)

6.2.5 Variation de puissance Inverter : systèmes VRV ou DRV

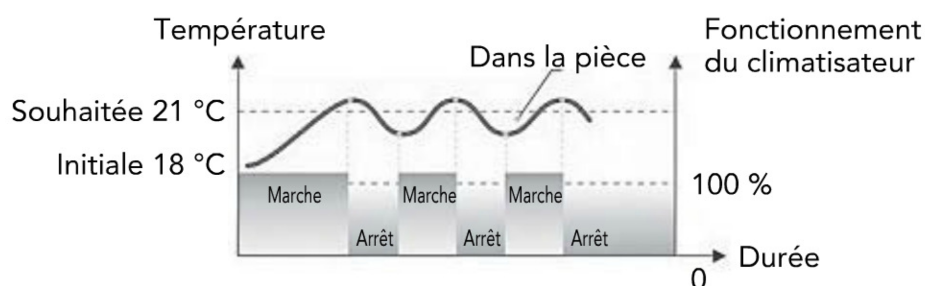
Les technologies faisant varier la puissance d'une pompe à chaleur sont désignées sous le terme Inverter. L'appellation **VRV** correspond à : **V**olume **R**éfrigérant **V**ariable. La désignation **DRV** signifie : **D**ébit **R**éfrigérant **V**ariable.

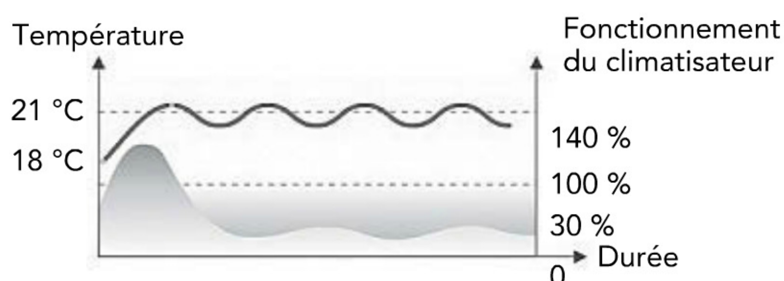
Inverter désigne la technologie utilisée pour faire varier la puissance des groupes VRV. Le mode de fonctionnement Inverter est beaucoup plus souple, la puissance de la PAC s'adapte aux besoins, contrairement à la PAC conventionnelle qui fonctionne en tout ou rien. Cette technologie bien adaptée aux compresseurs Scroll améliore la performance énergétique de la PAC et augmente sa durée de vie.

La solution Inverter (*figure 6.16*) permet de réduire la consommation électrique de 10 % à 20 % par rapport à une pompe à chaleur classique. La montée en

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

puissance progressive du compresseur améliore également le confort des occupants. Associée à un chauffage au sol, la pompe géothermique Inverter assure en effet une température intérieure homogène, constante et linéaire.





* Exemple en mode chauffage

Figure 6.16 – Comparaison entre système conventionnel et Inverter

Copyright © 2014 Dunod.

7 Présentation des sources

Le principe de la pompe à chaleur consiste à extraire de la chaleur gratuite d'un milieu extérieur (source froide). Cette chaleur est ensuite transférée à une température supérieure pour un milieu où un besoin de chaleur existe (source chaude).

Comme on l'a vu au chapitre 2, les performances du système vont dépendre de la nature des 2 sources, et en particulier, de leur niveau de température.

D'un point de vue strictement thermodynamique, la chaleur gratuite concerne toute source dont la température est au-dessus du zéro absolu, à savoir : –273 °C.

Notre environnement extérieur immédiat offre des ressources illimitées constituées par l'air extérieur, le sous-sol à plus ou moins grande profondeur, l'eau des aquifères, l'eau des rivières, de la mer…

7.1 Air

L'air extérieur est présent partout ; le principe de prélèvement de chaleur est simple et le moins coûteux des différents systèmes disponibles. Son principal inconvénient est l'évolution de sa température qui confère à la pompe à chaleur le plus mauvais rendement au moment où les besoins de chaleur sont les plus importants (en hiver). La baisse des performances en hiver est accentuée par les phénomènes de givrage de l'évaporateur. Les PAC utilisant l'air extérieur sont néanmoins bien adaptées en mi-saison et pour les climats tempérés du sud de la France.

L'air extrait dans le cadre d'un renouvellement d'air a l'avantage d'avoir une température constante et égale à la température ambiante du local. Une pompe à chaleur associée à un dispositif double flux permet d'en améliorer les performances. La réglementation prévoit un débit d'air neuf de 25 m^3/h par personne.

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

Les débits disponibles sont insuffisants pour assurer la totalité des besoins énergétiques, notamment pour les bâtiments conçus avant la RT 2005. Un chauffage d'appoint est généralement nécessaire, par des convecteurs électriques ou mieux par un poêle ou insert bois. Pour les bâtiments BBC et pour ceux respectant la RT 2012, il peut être envisagé d'assurer le renouvellement d'air tout en assurant tout ou partie du chauffage et du rafraîchissement doux de l'habitat (*figure 7.1*).

Il est également possible d'assurer la production d'eau chaude sanitaire, notamment avec un bon rendement en période estivale. La même pompe à chaleur exploite les calories de l'air extrait et réchauffe un ballon sur le même principe que le chauffe-eau thermodynamique.

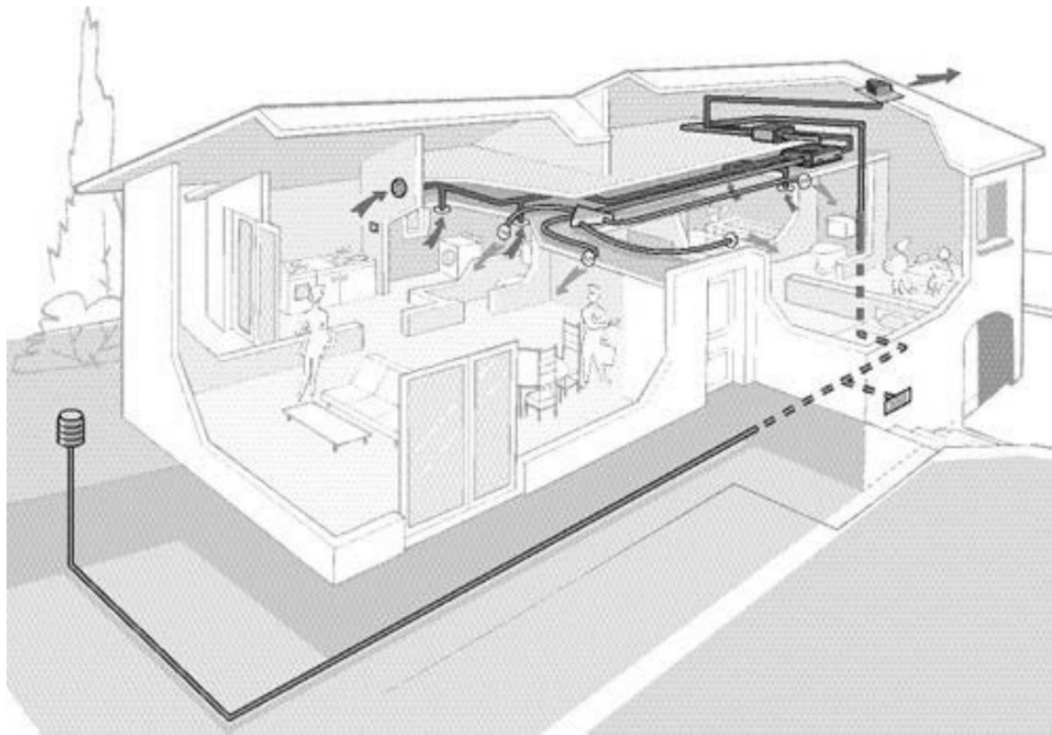


Figure 7.1 – VMC double flux avec PAC (source Aldes)

7.2 Eau

7.2.1 Nappes aquifères

Un aquifère est une formation perméable et poreuse contenant de l'eau mobilisable par forage.

Pour son utilisation avec une pompe à chaleur, **l'eau des nappes aquifères** nécessite la réalisation d'un et généralement de deux forages (doublet). Certaines régions, notamment les zones sédimentaires, sont plus favorables à ce type d'utilisation (*figure 7.2*).

Copyright © 2014 Dunod.

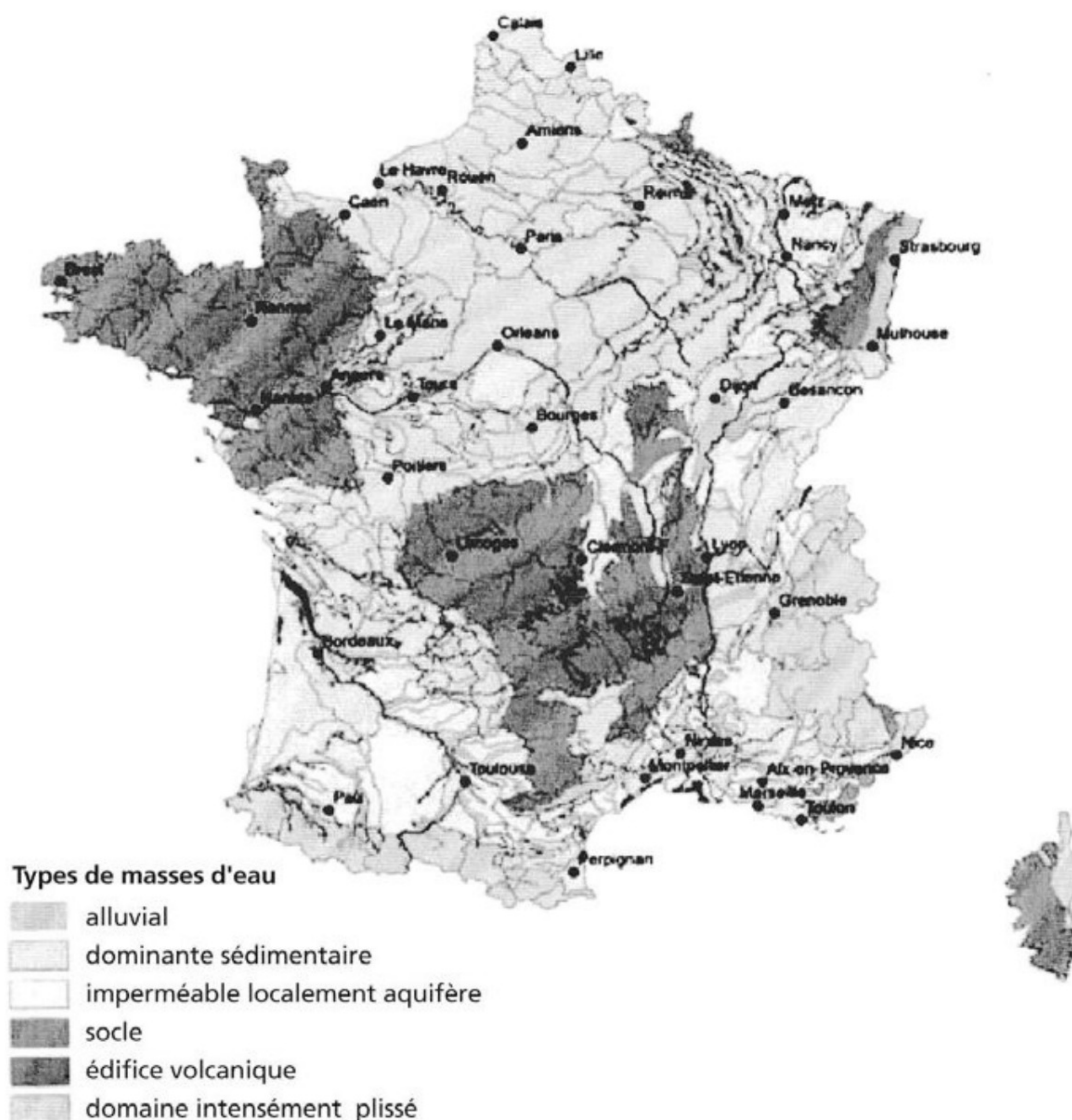


Figure 7.2 – Principales « masses d'eau souterraine »

Ces nappes aquifères se situent à une plus ou moins grande profondeur. La température varie en fonction du gradient de température (3 à 4 °C par 100 m). Pour la majorité des régions (exemple Île-de-France – *figure 7.3*), il existe un système d'information géographique permettant d'afficher les principales caractéristiques probables de la ressource aquifère (site Internet : www.geothermie-perspectives.fr).

L'exploitabilité d'un aquifère est déterminée par les paramètres suivants :

- la porosité (exprimée en %) ;
- la transmissivité (aptitude à fournir un débit exprimé en m^2/s) ;
- la composition chimique du fluide ;
- la piézométrie de la nappe.

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

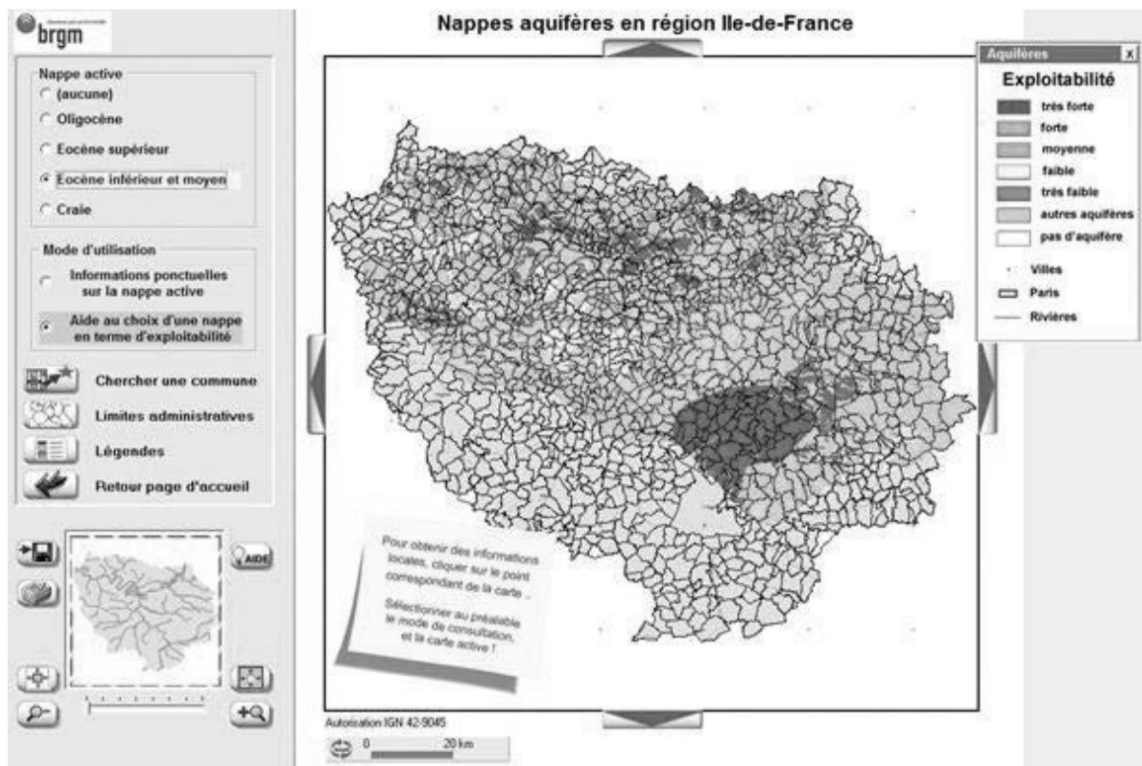


Figure 7.3 – Carte de la nappe Eocène inférieur et moyen (Île-de-France)

Profondeur < 100 m ; débit jusqu'à 100 m^3/h ; température 10-15 °C.

Les nappes aquifères à faible profondeur peuvent être très productrices dans certaines régions (bassin parisien, Alsace…). Elles sont parfaitement adaptées pour satisfaire les besoins thermiques des bâtiments *via* des pompes à chaleur.

Le risque géologique de ne pas trouver un débit suffisant à l'issue du forage existe et peut être couvert par un système de garantie (Aquapac ; *Annexe 2*).

Certaines régions peuvent également accéder à des nappes plus profondes à des températures plus élevées. Jusqu'à environ 30 °C, une pompe à chaleur est généralement indispensable. Au-delà de cette température, il est possible de faire de l'échange direct pour des bâtiments bien adaptés : c'est le cas des opérations exploitant la nappe du Dogger en Île-de-France, 55 × T < 80 °C ou dans l'Éocène en Aquitaine.

7.2.2 Eau de rivière, étang

Le prélèvement de calories dans l'eau de rivière ou d'étang (*figure 7.4*) se fait, soit par prélèvement, soit par échange. L'accès à cette ressource est facile, un certain nombre de contraintes doivent cependant être prises en compte :

- l'encrassement des échangeurs, notamment pour les échangeurs immergés ;

Copyright © 2014 Dunod.

- les autorisations administratives pour l'implantation, le prélèvement, le rejet ;
- la limitation du ΔT en hiver susceptible de dégrader la performance ;
- les risques d'étiage à certaines périodes.



Figure 7.4 – Boucle d'étang (Canada)

Une partie du chauffage urbain de la ville de Zurich est assurée par des pompes à chaleur alimentée par l'eau d'un lac à 4 °C. Cette source de chaleur assure également le rafraîchissement en été des hôtels et des bureaux.

Un projet pilote à Genève vise à remplacer une vingtaine de chaudières par un chauffage centralisé. Une pompe à chaleur haute température, située au quai du Seujet, récupèrera la chaleur de l'eau du Rhône pour alimenter 3 500 logements *via* un réseau de chauffage urbain.

7.2.3 Eau de mer

Le potentiel thermique de la mer est considérable et quasi inépuisable.

Outre son aspect corrosif, l'eau de mer présente des particularités intéressantes, tant en termes de son utilisation pour le chauffage que pour le rafraîchissement.

Prenons l'exemple d'une commune sur la côte Sud méditerranéenne :

En hiver, à une profondeur de 5 m, l'eau est à 15 °C, elle peut être rejetée à 9 °C.

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

En été, sa température est de 22 °C et peut être rejetée à 32 °C si elle est utilisée en rafraîchissement.

En mode chauffage, le delta T est de 6 °C entre le captage et le rejet de l'eau de mer ; de plus, le débit prélevé n'est pas limité.

Des applications anciennes existent dans la principauté de Monaco. On en trouve des plus récentes à La Seyne-sur-Mer (54 000 m² de tertiaire et logements). À Cherbourg (1 308 logements), captage dans le bassin du Commerce.

Des pompes à chaleur sur eau de mer alimentent également les réseaux de chaleur et de froid des capitales scandinaves comme Helsinki (16,4 MW chaud) dans la *figure 7.5*, Oslo (5,4 MW chaud).

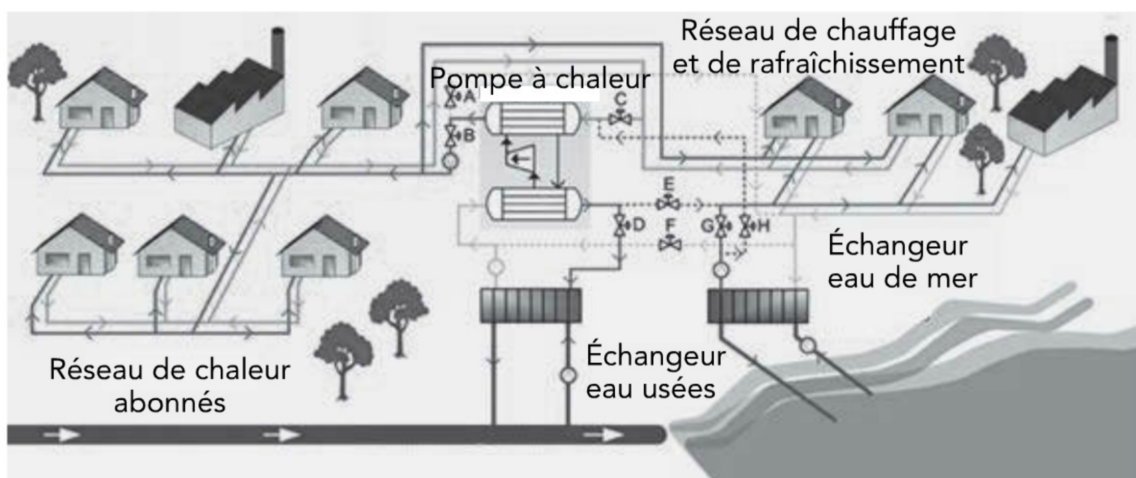


Figure 7.5 – Schéma de principe d'un réseau de chaleur sur eau de mer et eaux usées à Helsinki (source : Friotherm)

7.2.4 Eaux usées

Les eaux qui s'évacuent des maisons ont été préalablement chauffées pour les usages domestiques (douches, cuisines…) et conservent à la sortie une température comprise entre 11 et 17 °C selon les saisons et les lieux (*figure 7.7*). Autrement dit, en hiver, les eaux usées sont plus chaudes que l'air ambiant et, en été, c'est l'inverse, d'où l'idée de recycler cette chaleur pour la réutiliser localement, selon les saisons, comme source de chauffage ou de refroidissement. Le principe (*figure 7.6*) repose sur un échangeur de chaleur placé dans la canalisation des eaux usées et une pompe à chaleur (PAC) installée dans les bâtiments.

Copyright © 2014 Dunod.

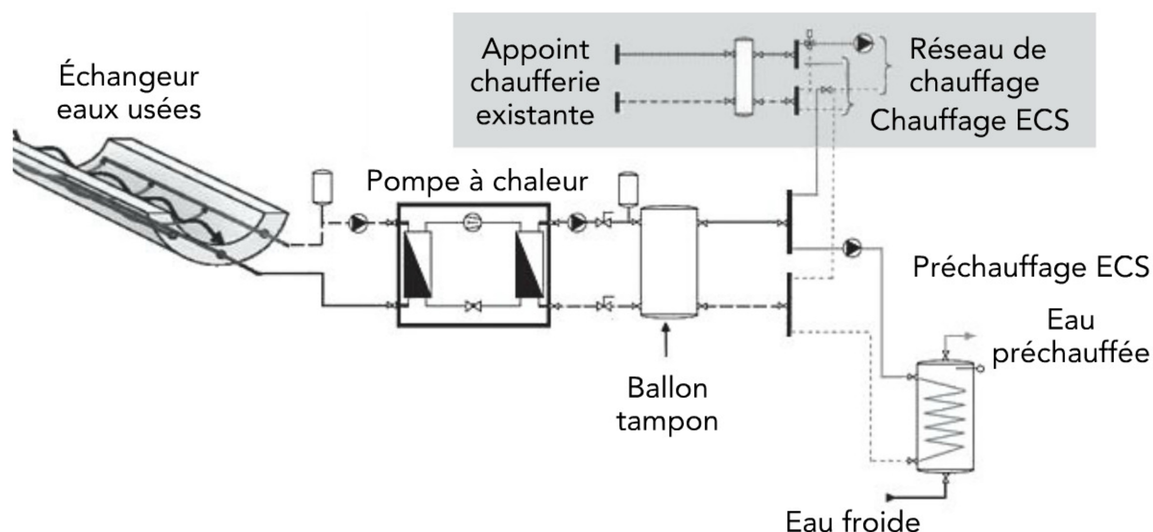


Figure 7.6 – Schéma de principe d'une PAC sur eaux usées (Degrés Bleus®)

L'échangeur est entre autres constitué d'un circuit de canalisation en boucle fermée qui transporte l'eau. Les tuyaux ainsi que l'eau du circuit intérieur vont être chauffés par la chaleur des eaux usées. Cette technologie connaît un très fort développement en Suisse, en Allemagne, en Autriche et aux États-Unis, à travers de nombreuses réalisations. Quelques opérations viennent de démarrer en France : Levallois-Perret, Valenciennes (hôtel de ville), Bordeaux (hôtel de la Communauté), Nanterre (quartier Sainte-Geneviève), Roquebrune-Cap-Martin.

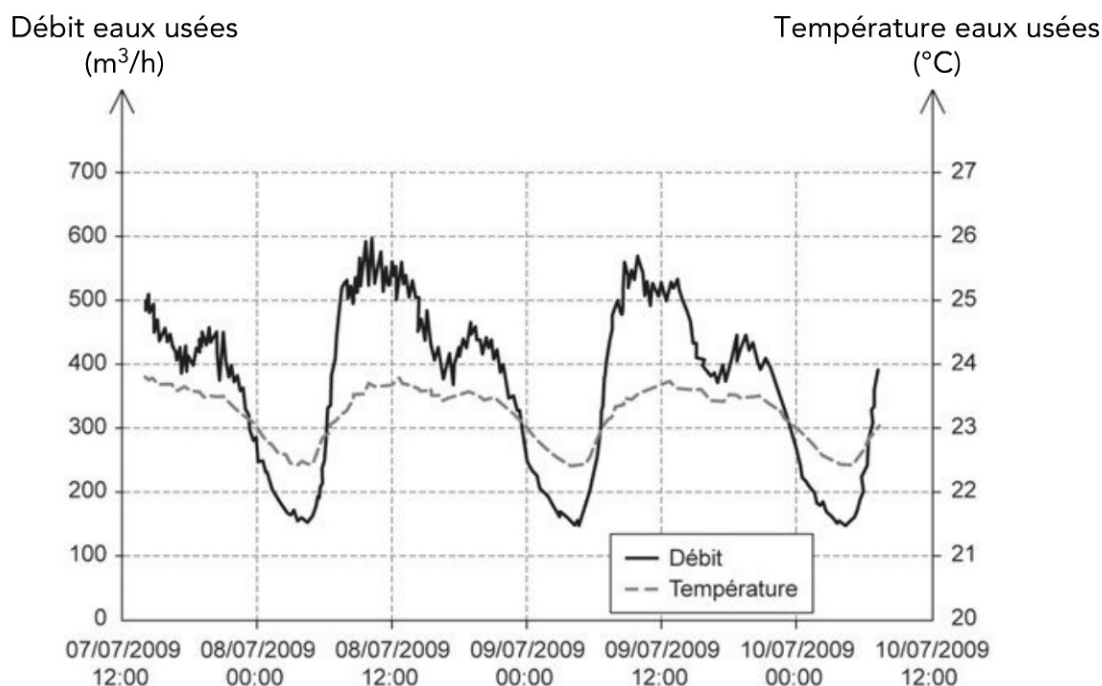


Figure 7.7 – Relevés (température et débit) sur un réseau d'eaux usées

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

La récupération d'énergie peut se faire soit directement dans les canalisations du réseau d'assainissement (cas de Nanterre), soit à partir d'eau épurée issue d'une station d'épuration (cas de Roquebrune-Cap-Martin). Dans le second cas, la récupération des calories consiste à faire transiter une partie des eaux épurées à travers une boucle raccordée sur la conduite de refoulement de la station d'épuration pour la faire passer dans un échangeur thermique qui transférera ses calories à un circuit d'eau douce tempérée alimentant les pompes à chaleur.

7.3 Échange avec le sol

La température du sol augmente avec la profondeur : c'est le phénomène de gradient. En France, l'augmentation moyenne de température se situe entre 3 et 4 °C par 100 m. En surface, sur les premiers mètres, le sol subit l'influence du climat (*figure 7.8*).

La température sur les 10 premiers mètres est contrôlée par les échanges avec l'atmosphère (soleil, pluviométrie, vent). Le sous-sol se comporte comme un accumulateur d'énergie avec des variations saisonnières.

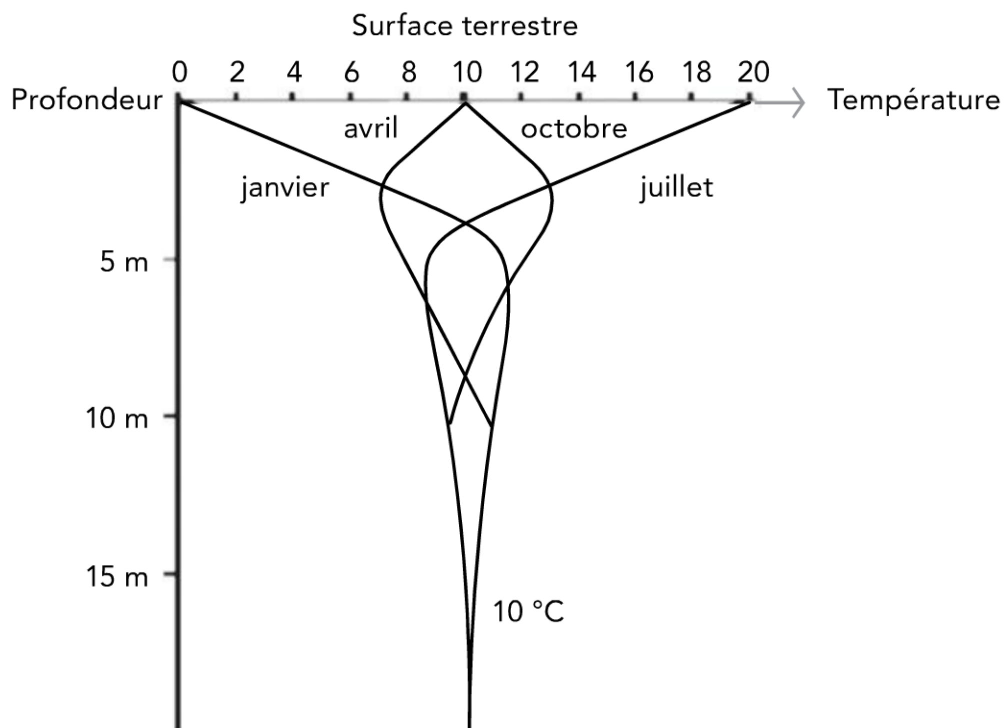


Figure 7.8 – Température du sous-sol en fonction de la profondeur et des saisons

Copyright © 2014 Dunod.

En profondeur, le flux géothermique est le seul apport énergétique. Le prélèvement de chaleur se fait par échange avec le sol. La puissance prélevée (*tableau 7.1*) est fonction de la nature géologique du sous-sol caractérisée par les principaux paramètres suivants :

- conductivité thermique ;
- chaleur spécifique ;
- masse volumique ;
- taux d'humidité.

Tableau 7.1 – Conductibilité thermique des terrains

Roches		Conductibilité thermique W/m · K	
		Sec	Saturé
Roches meubles	Argile	0,2-0,3	1,2-1,6
	Sable	0,3-0,4	2,0-3,2
	Gravier	0,3-0,4	2,5-3,3
Roches cohérentes	Calcaire	2,8-3,3	2,8-3,3
	Grès	1,8-3,5	2,3-4,0
	Granite	2,6-3,8	2,7-3,8
	Schiste	1,4-2,5	1,4-2,6

La conductibilité est très sensible à la saturation en eau des roches à grande porosité.

L'échange de chaleur avec le sol se fait par l'intermédiaire de capteurs. Il existe différentes sortes de capteurs.

7.3.1 Les capteurs horizontaux

Les **capteurs horizontaux**, placés entre 0,6 et 1,5 m de profondeur, sont constitués de tubes, soit en PEHD dans lesquels circule de l'eau glycolée, soit en cuivre si c'est le fluide frigorigène qui y circule (*figure 7.9*).

À cette profondeur, le climat joue un rôle important sur la température du sol. Le prélèvement en hiver est reconstitué tout ou partie pendant les périodes estivales. C'est pour cela que ces sondes sont parfois désignées sous le vocable géosolaire. La capacité de prélèvement est de l'ordre de 20 W/mètre linéaire de capteurs ; elle varie selon la nature du terrain.

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

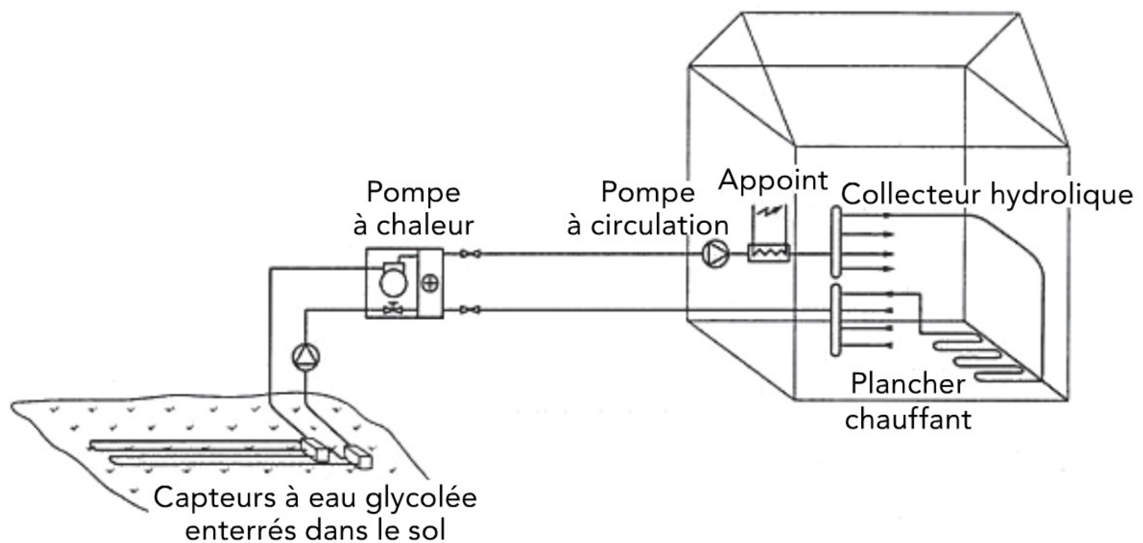


Figure 7.9 – Capteurs horizontaux pour une maison individuelle

7.3.2 Les sondes géothermiques verticales

Les sondes géothermiques verticales consistent à aménager un forage d'une centaine de mètres de profondeur afin d'y associer un système d'échange avec le terrain. L'échange est réalisé par la mise en place dans le forage de 2 tubes en U en PEHD dans lesquels circule un fluide caloporteur (eau glycolée).

Une fois les tubes mis en place, l'espace résiduel est comblé par un ciment caractérisé par sa bonne conductibilité thermique (mélange bentonite ciment).

La capacité de prélèvement est là aussi dépendante de la nature géologique du sous-sol traversé (*figure 7.10*). Les applications concernent à la fois les maisons individuelles qui nécessitent une ou deux sondes de 100 m et les petits collectifs et immeubles du tertiaire pour lesquels il peut être créé un champ de sondes pouvant comporter jusqu'à 100 sondes, voire davantage.

Copyright © 2014 Dunod.

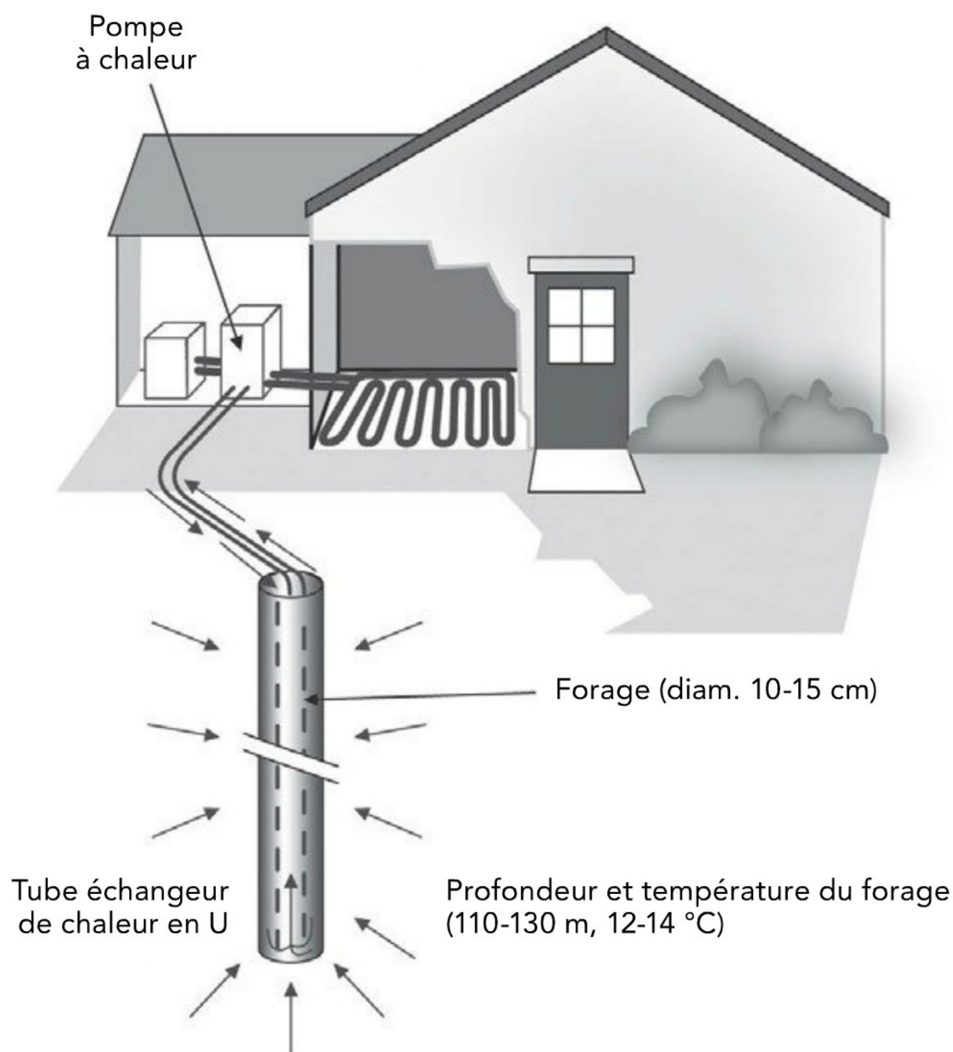


Figure 7.10 – Sonde verticale pour une maison individuelle

Il existe plusieurs variantes aux 2 systèmes de captage précédents :

Les **corbeilles géothermiques** (voir *figure 7.11*). Elles présentent l'avantage de ne pas nécessiter de machines de forage pour leur mise en place, et une pelleteuse suffit généralement. Elles sont cylindriques (*figure 7.11a*) ou tronconiques (*figure 7.11b et c*) et leur capacité de prélèvement varie selon leurs tailles de 1 à 2 kW.

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

a



b



c



Figure 7.11 – Exemples de corbeilles (source : Betatherm)

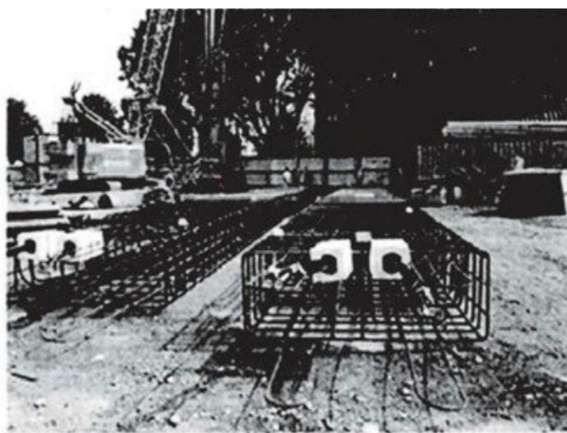
Copyright © 2014 Dunod.

7.4 Les fondations géothermiques

Elles sont mises en place lorsqu'un bâtiment nécessite des fondations profondes, pieux préfabriqués, parois de fondation ou de soutènement, dalles de fondation, dans lesquelles sont implantés des tubes afin de créer un échangeur de chaleur avec le terrain et de le relier à une pompe à chaleur (*figure 7.12*). Cette technologie développée depuis plusieurs années en Autriche et en Suisse connaît un début de développement en France.



Cage d'armatures munie de tubes
(source : www.zent-frenger.de)



Cage d'armatures pour parois moulées - munie de tubes PEHD
(source : Stent – Balfour Beatty)

Figure 7.12 – Exemple d'armature de pieux de fondations équipées avec des tuyauteries (source Nägelbau)

7.5 Capteurs solaires

Il est possible d'associer une pompe à chaleur eau/eau et un capteur solaire basse température. Le principe développé par la société Héliopac (*figure 7.13*) est constitué d'un capteur solaire souple (ou moquette solaire) qui sert de source froide à la pompe à chaleur (PAC). Il fonctionne en échangeur atmosphérique lorsque l'énergie solaire n'est pas suffisante (nuit, temps pluvieux, brouillard, température…). Le capteur solaire et la PAC, associés à un volume de stockage ECS, constituent un générateur d'ECS fonctionnant en semi-accumulation qui permet de produire en continu, jour et nuit, de l'eau chaude sanitaire (ECS) avec un encombrement réduit et une faible puissance installée.

Un appoint hivernal (électrique ou par échangeur) est indispensable.

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

Ce procédé est bien adapté pour la fourniture d'eau chaude sanitaire (pour un hôtel par exemple). Il existe quelques exemples en région parisienne.

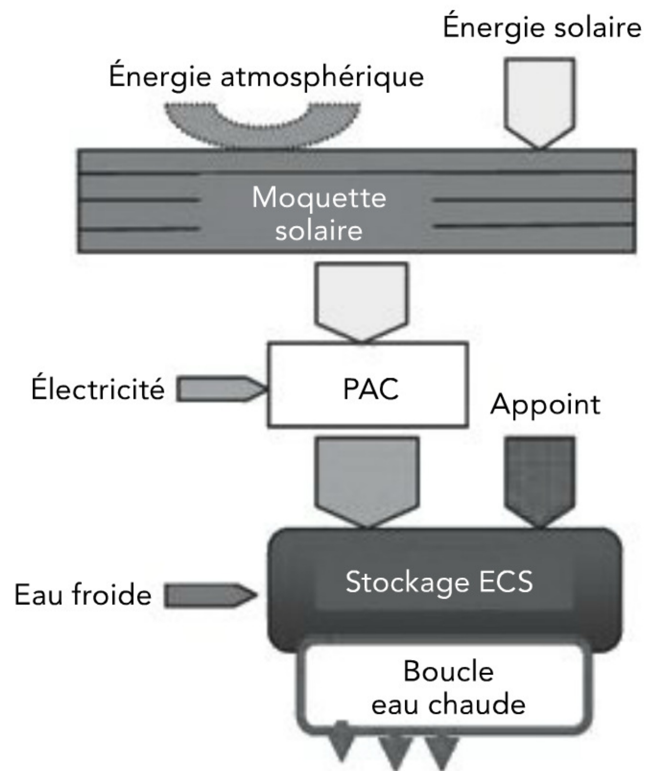


Figure 7.13 – Schéma de principe (Héliopac)

Copyright © 2014 Dunod.

8 Pompe à chaleur air extérieur

La pompe à chaleur utilise l'air extérieur au bâtiment comme source froide en mode chauffage. La restitution des calories du milieu à chauffer se fait, soit en mode aéraulique (air-air), soit en mode hydraulique (air-eau) (paragraphe 7.2.3).

8.1 Présentation

La captation de chaleur à l'extérieur se fait grâce à un échangeur au niveau de l'évaporateur et à un ventilateur profilé qui assure la bonne circulation de l'air autour de l'échangeur.



Figure 8.1a – PAC air/eau petite puissance © Rotex

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.



Figure 8.1b – PAC air/eau réversible grande puissance

Cette unité extérieure est adossée, soit au mur, soit dans le jardin pour les maisons individuelles (*figure 8.2*). Pour les ensembles plus importants tels que les logements collectifs ou les immeubles du tertiaire, l'unité extérieure peut être implantée en terrasse ou en balcon. Son implantation doit tenir compte des vents dominants et des bruits susceptibles d'être générés par le ventilateur et le compresseur.

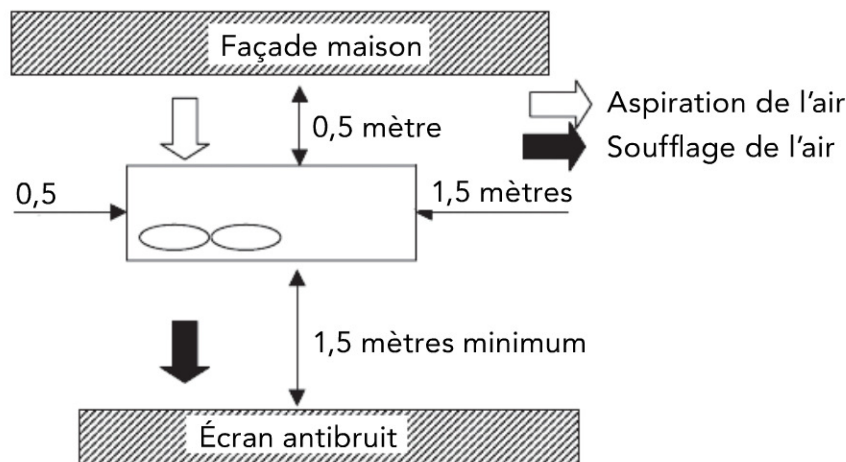


Figure 8.2 – Implantation unité extérieure maison individuelle

Les problèmes de bruits doivent être pris en considération, notamment vis-à-vis du voisinage. Un écran antibruit réalisé en parpaing peut être mis en place.

Une fiche technique de l'Afpac intitulée : « Pompes à chaleur & environnement acoustique » précise les bonnes pratiques d'installation, notamment :

- mise en place d'un matériau acoustique absorbant sur le(s) mur(s) derrière la PAC afin de réduire la réflexion du bruit sur la façade ;

Copyright © 2014 Dunod.

- si nécessaire, mise en place d'un écran antibruit constitué d'un matériau isolant et placé le plus près possible de la source sonore tout en permettant la libre circulation de l'air ;
- privilégier l'installation de la PAC sur un socle de béton d'inertie indépendant du bâtiment. Ce socle ainsi que toutes les reprises de charges sur le bâtiment doivent être munis de dispositifs antivibratiles ;
- prévoir des dispositifs d'atténuation des vibrations des liaisons hydrauliques ou aérauliques.

Ces pompes à chaleur sur air extérieur peuvent être réversibles. En été, la chaleur est rejetée par l'unité extérieure qui devient condenseur.

Si l'on compare les propriétés thermiques de l'air et de l'eau figurant dans le *tableau 8.1*, on constate que, compte tenu de sa faible densité, de sa faible capacité calorifique et de sa faible conductivité, des volumes d'air importants sont nécessaires pour satisfaire les besoins thermiques d'un bâtiment.

Tableau 8.1 – Caractéristiques physiques (eau, glace, air)

	Masse volumique (kg/m³)	Capacité calorifique (kJ/K · kg)	Conductibilité thermique (W/K · m)
Eau	1 000	4,20	0,585
Glace	920	2,10	2,20
Air	1,2	1,00	0,023

1 m^3 d'eau refroidie de 1 °C libère 1 162,7 Wh, contre seulement 0,34 Wh/(m^3.K) pour l'air (1 m^3 d'air refroidi de 1 °C libère 0,34 Wh).

En ce qui concerne les performances, il faut tenir compte de l'évolution des températures liées au contexte climatique. Le deuxième principe de Carnot montre là toute son incidence. L'écart de température entre les sources est maximum lorsque les besoins sont les plus importants. À ce phénomène, il faut ajouter le problème du givrage de l'évaporateur qui se produit sur les ailettes de l'échangeur de l'évaporateur à basse température et humidité relative élevée. Le givrage réduit le débit d'air au travers de l'échangeur et, par conséquent, les transferts de chaleur entre l'air ambiant et l'échangeur. Cette diminution de débit génère une augmentation de la puissance appelée par le compresseur.

Un dégivrage est indispensable et doit être réalisé, soit en inversant pendant un certain temps le cycle de fonctionnement si la PAC est réversible, soit par une résistance électrique de dégivrage au niveau de l'évaporateur.

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

Le dégivrage s'effectue de façon cyclique à intervalles réguliers à partir d'une température extérieure susceptible de provoquer le givrage.

Ces phénomènes ont une influence sur la performance de la pompe à chaleur, illustrée par la *figure 8.3.*

On constate à travers l'exemple figurant sur le *graphique 8.3* que la puissance thermique apportée par la PAC est très dépendante de la température extérieure. La puissance thermique de la PAC sera d'autant plus faible que la température extérieure sera basse. Cette évolution est la conséquence du principe de Carnot évoqué dans le *paragraphe 2.1*, ainsi que du phénomène de givrage de l'évaporateur. Si l'on considère comme constante la puissance électrique du compresseur, on peut suivre sur le graphique l'évolution du coefficient de performance représenté par le rapport des segments AC/BC. Il est de l'ordre de 2,3 pour une température extérieure de –7 °C et de l'ordre de 3,5 pour une température extérieure de 10 °C. Ce type de pompe à chaleur est relativement performant en mi-saison et aussi bien adapté au climat méditerranéen.

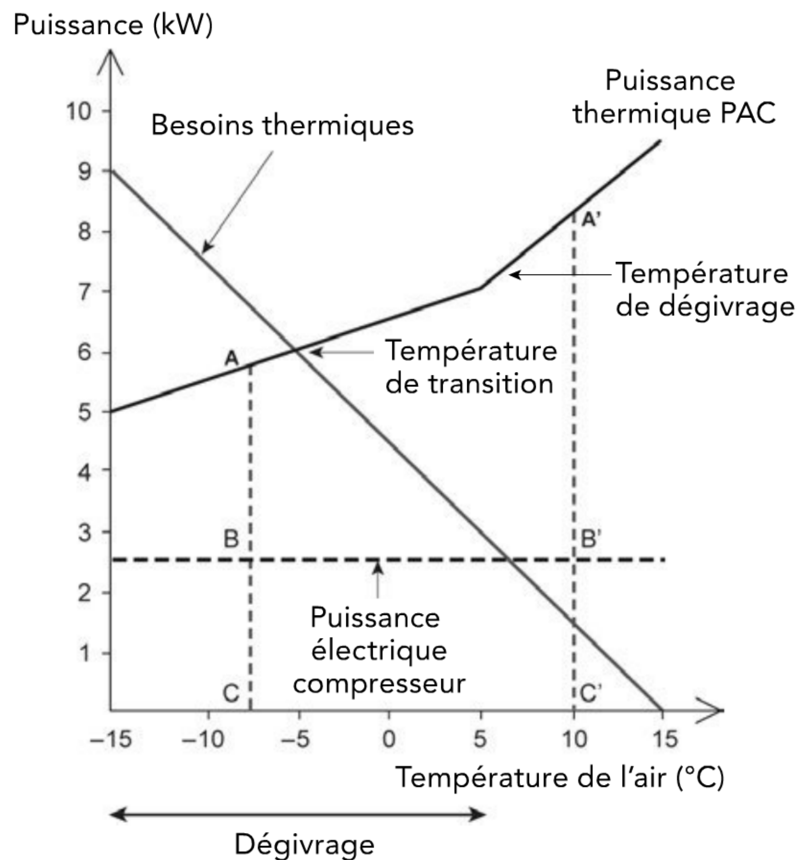


Figure 8.3 – Puissance thermique de la PAC

Pour des climats plus rigoureux comme représenté dans la *figure 8.4*, il est souvent nécessaire de disposer d'un système d'appoint.

Copyright © 2014 Dunod.

On distingue 3 phases de fonctionnement :

- au-delà de la température de transition, la PAC seule assure la totalité des besoins ;
- en dessous de la température de transition, l'appoint est nécessaire pour compléter l'apport de la PAC ;
- en dessous d'une certaine température extérieure, le COP se dégrade et la PAC n'est plus en mesure de fournir une température suffisante pour alimenter les émetteurs. La chaudière existante ou à mettre en place assure seule les besoins.

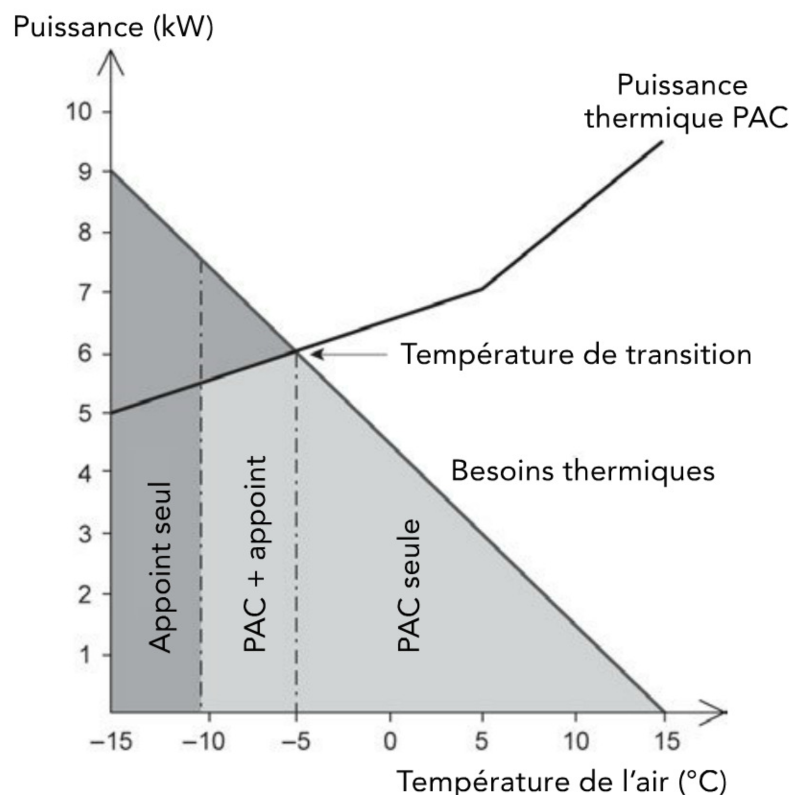


Figure 8.4 – Phases de fonctionnement d'une PAC en climat rigoureux

8.2 Phénomènes de givrage

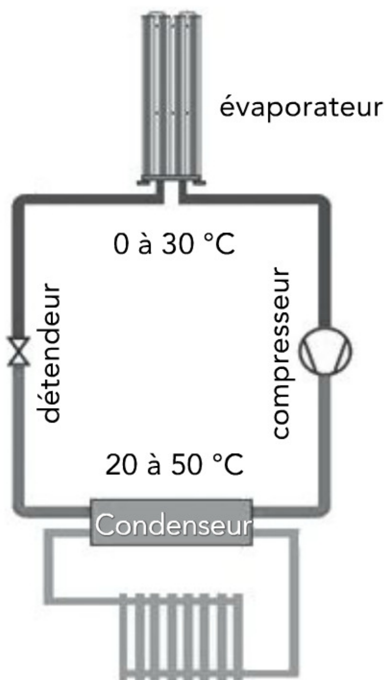
Les PAC sur air sont confrontées au problème du givrage de l'évaporateur quand la température de l'air extérieure approche les 5 à 6 °C. Ce phénomène de givrage est accentué lorsque l'air est chargé d'humidité. L'eau de l'air humide se transforme en givre ou en glace et va obstruer l'évaporateur ce qui va nécessiter un dégivrage. Le dégivrage est obtenu en général en faisant fonctionner la PAC en sens inverse pendant un certain temps. Il peut également être obtenu par l'adjonction d'une résistance électrique à proximité de l'évaporateur. Cette

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

nécessité de dégivrage n'est pas sans influence sur le rendement de la pompe à chaleur. Une mauvaise programmation des opérations de dégivrage peut dégrader le COP de manière significative.

8.3 Tube aérotherme

Cette technologie, très utilisée dans les pays scandinaves, commence à se développer en France (*figure 8.5*). L'évaporateur de la PAC est constitué de profils d'aluminium qui condensent la vapeur de l'air en eau, laquelle se transforme ensuite en givre. À noter que la formation de givre n'est pas dans ce procédé un inconvénient puisqu'il contribue à l'échange à température constante avec une bonne conductibilité thermique. Ce système appelé « *Ice Stick* » offrant une grande surface d'échange, est situé à l'extérieur à proximité de l'ensemble à chauffer et, contrairement aux systèmes décrits précédemment, n'a pas besoin de ventilateur (donc silencieux). Le système fonctionne à détente directe et utilise comme fluide frigorigène le R 290 (propane) à faible GWP ou 407C.



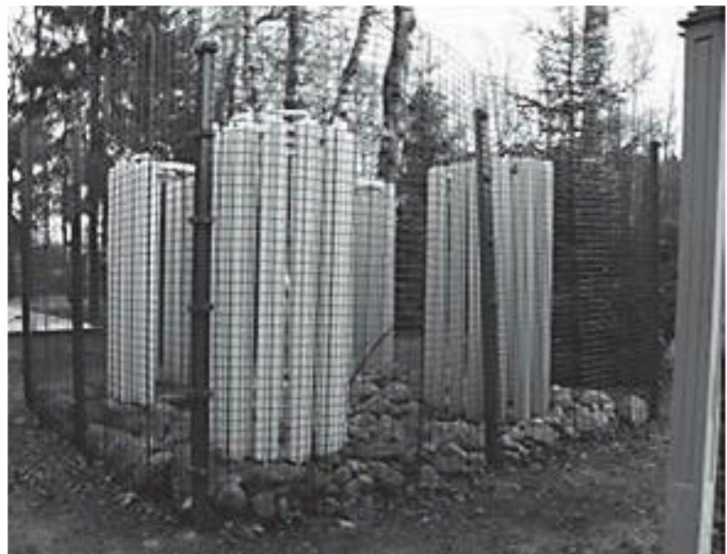


Figure 8.5 – Schéma de principe et exemple d'implantation – Source : Ma géothermie (55500 Velaines)

Copyright © 2014 Dunod.

8.4 Systèmes de distribution

8.4.1 Mode aéraulique splits

La distribution en **mode aéraulique** est souvent retenue pour les maisons individuelles, car elle est plus facile à installer et moins coûteuse. L'installation de diffusion thermique est constituée de ventilo-convecteurs ou splits aérothermiques. Les splits peuvent être installés au mur, au sol ou au plafond.

Une pompe à chaleur air-air multisplits permet de connecter plusieurs ventilo-convecteurs à un même module extérieur.

Chaque pièce peut être équipée d'un appareil de puissance différente.

Entre l'unité extérieure et les zones à chauffer ou à rafraîchir, il peut y avoir plusieurs unités intérieures reliées par un réseau à 2 tubes ou 3 tubes. Ces systèmes peuvent être qualifiés VRV (Volume Réfrigérant Variable). Ils utilisent la technologie INVERTER, afin d'adapter la puissance aux besoins thermiques des zones desservies.

Un système à **2 tubes** permet d'assurer alternativement les besoins de chaud et de froid.

Un système à **3 tubes** permet de distribuer du chaud et du froid simultanément en fonction des besoins des zones desservies. Il sera possible de chauffer ou de climatiser séparément chaque pièce.

8.4.2 Mode aéraulique centralisé

La distribution se fait selon le même principe que celui des centrales de traitement d'air décrites dans le *paragraphe 6.2.3*.

L'air chauffé ou rafraîchi par la pompe à chaleur réversible est ensuite distribué dans les pièces par un réseau de gaines. L'échange se fait au niveau d'un diffuseur généralement situé dans les combles du bâtiment. Pour des puissances importantes, plusieurs unités extérieures peuvent être raccordées au même diffuseur.

Il est important de prévoir un système de récupération de condensats en mode rafraîchissement.

L'air envoyé au diffuseur est prélevé en un seul endroit du bâtiment ou de la zone traitée. Il sera nécessaire de s'assurer de la compatibilité du système avec la VMC.

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

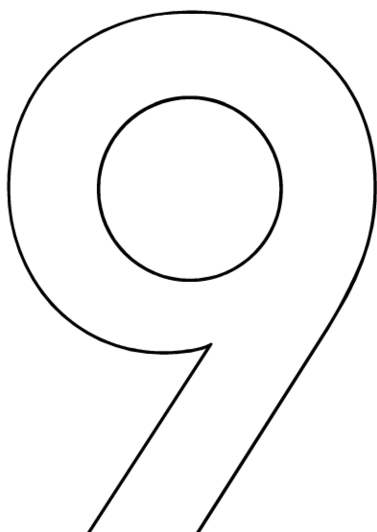
Ce système est moins souple et moins modulaire que les systèmes splits.

8.4.3 Mode hydraulique

En mode hydraulique, la PAC air-eau transmet les calories au niveau du condenseur après échange *via* un circuit secondaire où le fluide caloporteur est de l'eau. La distribution au bâtiment se fait par un module hydraulique qui alimente les émetteurs. Les émetteurs peuvent être des radiateurs « basse température », des planchers chauffants rafraîchissants ou des ventilo-convecteurs à eau. La réversibilité est possible pour les bâtiments équipés de plancher ou de ventilo-convecteurs, elle n'est pas envisageable avec des radiateurs.

La PAC air-eau est constituée de 2 modules. L'unité extérieure comporte l'échangeur, le ventilateur et le compresseur. À l'intérieur, se trouvent le module hydraulique où se passe l'échange entre le circuit du fluide frigorigène et la boucle d'eau (condenseur) et la pompe de circulation.

Copyright © 2014 Dunod.



Pompe à chaleur sur aquifère

La ressource en eau souterraine présente un intérêt particulier pour les usages thermiques. En effet, la température de l'eau souterraine est constante quelle que soit la saison, contrairement à l'air qui subit des écarts thermiques importants, ce qui permet un niveau de performance élevé des pompes à chaleur sur l'eau souterraine. Par ailleurs, la température des nappes peu profondes permet, sous certaines conditions, d'apporter du rafraîchissement par échange direct (*geocooling*).

9.1 Contexte

Une nappe d'eau souterraine correspond à l'ensemble des eaux comprises dans la zone saturée d'un aquifère, dont toutes les parties sont en liaison hydraulique.

Les aquifères concernés par les pompes à chaleur géothermiques sont des aquifères peu profonds dont la température est *a priori* inférieure à 30 °C.

Les nappes souterraines à faible profondeur sont présentes dans la plus grande partie du territoire français. Elles sont principalement exploitées pour des usages agricoles (cultures de maïs…), industriels, domestiques (eau potable). Leurs caractéristiques sont très variées d'un point à un autre.

En France, trois régions se distinguent dans le développement de cette filière : elles se situent à l'aplomb de zones sédimentaires.

- l'Alsace, qui dispose de la nappe alluviale du Rhin à faible profondeur et de forte perméabilité. Grâce à une politique incitative d'Électricité de Strasbourg, environ 80 opérations de taille significative ont été réalisées dans les années 1980 (puissance installée : 13,2 MW au compresseur). À noter l'utilisation de cette technique pour le Conseil de l'Europe, le Palais des Congrès et la Préfecture de Strasbourg. L'installation du Conseil de l'Europe mise en service en 1976 utilise un puits de captage à 75 m de profondeur avec un débit nominal de 800 m^3/h pouvant fournir une puissance calorifique de 8 000 kW.

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

- les régions Rhône-Alpes et Île-de-France en raison d'une bonne conjonction entre des nappes aquifères présentes dans leur sous-sol et des besoins de chauffage climatisation à l'aplomb de celles-ci dans les agglomérations urbaines. Dans le cadre de l'élaboration du Schéma régional air climat énergie (SRACE) de la région Île-de-France, plus d'une centaine d'opérations ont été identifiées. Elles concernent souvent des ensembles nécessitant à la fois des besoins de chaud et de froid (immeubles de bureaux à grandes surfaces vitrées).

9.2 Caractéristiques des aquifères

9.2.1 Température

Les nappes d'eau souterraines peu profondes contiennent de l'énergie thermique dont l'origine est solaire et terrestre. Au-delà de 20 m de profondeur, les variations thermiques d'origine solaire deviennent imperceptibles et la température croît graduellement sous l'effet du gradient géothermique (en moyenne 3 °C par 100 m) correspondant aux pertes de chaleur interne du globe terrestre (conductivité thermique).

La température moyenne des eaux des nappes entre 0 et 100 m est voisine de 12 °C. Elle peut dépasser 16 °C à proximité d'ouvrages d'injection utilisés principalement pour le refroidissement d'ensembles tertiaires, bureaux, commerces, salles de spectacles.

9.2.2 Porosité, transmissivité

La nature des terrains conditionne les caractéristiques hydrogéologiques des aquifères. La quantité d'eau qu'un aquifère emmagasine (réserve) et le débit qu'il écoule dépendent de ses dimensions (étendue, volume), de la porosité et de la perméabilité des roches qui le constituent.

La **porosité** est une caractéristique physique intrinsèque des terrains, elle est indépendante du mouvement de l'eau qui peut s'y trouver.

La **porosité totale** d'une roche correspond à la proportion de vide entre les éléments solides qui forment cette roche et qui peuvent contenir de l'eau. Elle est variable d'une roche à une autre, jusqu'à 50 %.

La **perméabilité** est une notion dynamique : c'est la propriété d'un terrain aquifère à laisser passer, à travers lui, l'eau mise en mouvement sous l'effet d'une différence de pression.

Copyright © 2014 Dunod.

La proportion de l'eau qui peut se mouvoir diffère généralement souvent beaucoup de la porosité totale. La porosité efficace prend en compte la quantité d'eau mobilisable.

L'argile, par exemple, peut contenir de 400 à 500 litres d'eau par m^3, par contre la quantité mobilisable n'est que de 10 à 20 litres.

Un cas particulier est constitué par les aquifères karstiques.

Les karsts se développent au sein des roches carbonatées (calcaires). Ils constituent un réseau souterrain de conduits plus ou moins développé et profond. Les aquifères karstiques sont caractérisés par de très forts contrastes de perméabilité entre la matrice calcaire très peu perméable et les vides qui ont été générés en son sein.

La porosité

La porosité se définit dans un milieu donné, comme le rapport du volume des vides au volume total du milieu. Elle s'exprime en pourcentage.

On distingue classiquement :

- les aquifères à porosité d'interstices : dans ces formations (graviers, sables, grès, craie), l'eau circule principalement entre les grains (sables, certains grès).
- la porosité d'interstices est la caractéristique des roches meubles (ou non consolidées) Les pores sont des vides de petite taille et de forme généralement sphérique. L'analyse granulométrique (*tableau 9.1*) permet une classification en fonction de la taille des grains :

Tableau 9.1 – Analyse granulométrique des roches

Désignation		Diamètre des grains mm
Caillou, pierre, bloc		> 16
Gravier, gravillon		2 à 16
Sable	Gros	0,5 à 2
	Moyen	0,25 à 0,5
	Fin	0,06 à 0,25
Silt		0,002 à 0,06
Argile		< 0,02

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

- les aquifères fissurés/fracturés (*figure 9.1*) : les roches qui les constituent (granites, roches métamorphiques, calcaires) sont très peu poreuses mais le réseau de fractures parfois bien développé qui les affecte peut en faire des aquifères intéressants (exemple aquifère de la craie en Île-de-France).

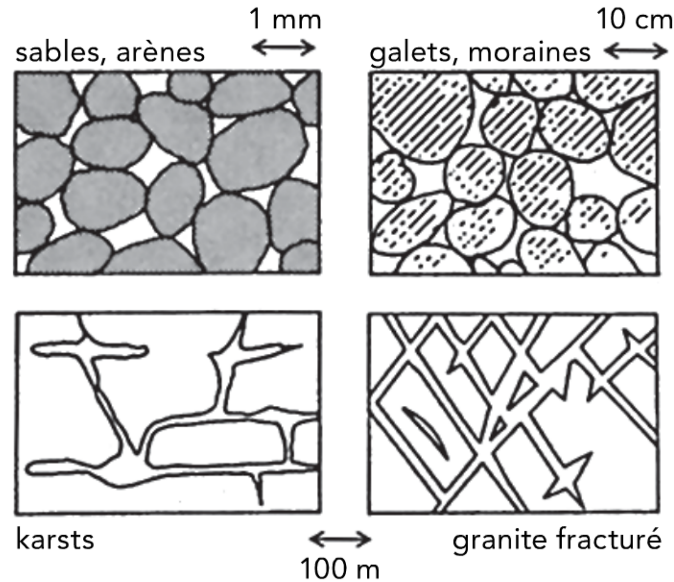


Figure 9.1 – Types de porosité

La perméabilité

La porosité renseigne sur la quantité d'eau contenue dans un aquifère mais ne permet pas d'évaluer la quantité qui pourra en être extraite, donc le débit exploitable en surface. L'autre caractéristique hydrodynamique d'un aquifère est la perméabilité.

La perméabilité d'un aquifère est la propriété d'un aquifère à laisser passer, à travers lui, l'eau en mouvement sous l'effet d'une différence de pression.

Elle traduit la résistance du milieu à l'écoulement de l'eau qui la traverse

Elle s'exprime par le coefficient de perméabilité **K**, en mètres par seconde, lié au débit de fluide par unité de surface de roche traversée V et au gradient de pression exercé par le fluide dP/dx, et s'exprime par la relation :

$$V = K \cdot dP / dx$$

Copyright © 2014 Dunod.

La perméabilité est fonction des caractéristiques granulométriques de la roche, (forme des grains, degré d'interconnexion). Les graviers, par exemple, présentent un coefficient de perméabilité plus important que les sables fins ; ils sont donc plus perméables.

La classification en fonction de leur perméabilité est donnée dans le *tableau 9.2* :

Tableau 9.2 – Exemples de perméabilité

Désignation	Perméabilité m/s
Roches perméables	$K > 10^{-4}$
Roches semi-perméables	$10^{-4} > K > 10^{-9}$
Roches imperméables	$K < 10^{-9}$

Porosité et perméabilité sont deux notions bien distinctes : une roche peut être poreuse mais imperméable, c'est le cas notamment de l'argile.

Dans certains réservoirs souvent granitiques ou calcaires, la perméabilité est due à la présence d'un réseau interconnecté de fissures dans la roche réservoir.

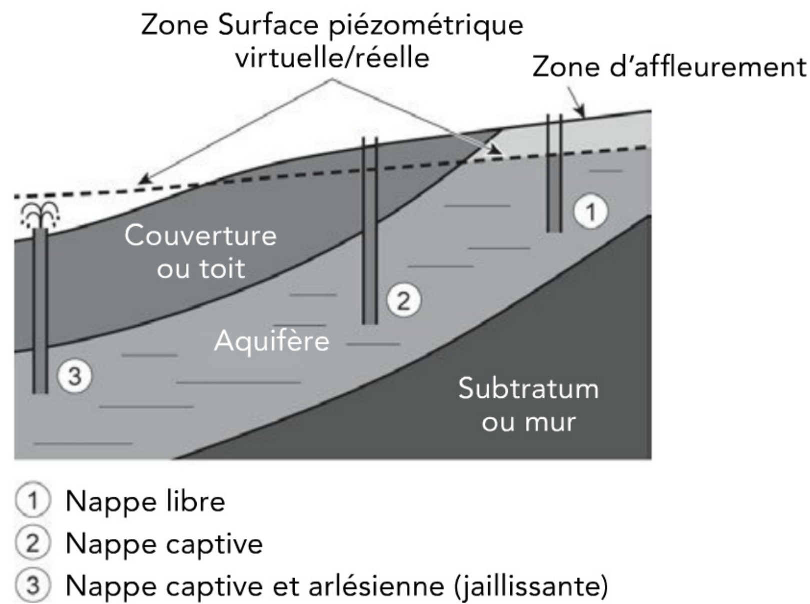
9.2.3 Piézométrie

Un aquifère est alimenté en eau dans les zones d'affleurement où le contexte géologique est perméable. Le niveau piézométrique d'une nappe correspond au niveau de l'eau au repos mesuré sur un forage.

La *figure 9.2* fait la distinction entre nappe libre et nappe captive. Lorsque la nappe est libre (cas 1), le niveau piézométrique de la nappe superficielle correspond à la limite entre la zone non saturée et la zone saturée en eau. Son niveau peut varier en fonction de la pluviométrie du site. Il se transmet à distance selon le principe des vases communicants.

La nappe est dite captive, lorsqu'elle est surmontée d'une couche imperméable (cas 2). Si l'on réalise un forage, l'eau remonte jusqu'au niveau piézométrique. Si le niveau piézométrique se situe au-dessus de la surface du sol (appelé virtuel dans ce cas), l'eau jaillit naturellement. On dit que le forage est artésien.

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.



① Nappe libre
② Nappe captive
③ Nappe captive et arlésienne (jaillissante)

Figure 9.2 – Nappe libre – Nappe captive

9.2.4 Caractéristiques physico-chimiques

La composition chimique des eaux est liée aux échanges avec les éléments gazeux et solides avec lesquels elle est entrée en contact. Toute modification des paramètres physiques externes fait varier les équilibres.

Des analyses d'eau sur place et en laboratoire doivent être réalisées afin d'évaluer les précautions à prendre contre les phénomènes d'entartrage et de corrosion notamment :

- pH, Conductivité électrique, potentiel redox ;
- *Gas liquid ratio* (GLR) ; point de bulle ;
- présence de bactéries ;
- oxygène dissous ; H_2S ; CO_2 ;
- cations : Ca, Mg, Na, K, Fe, Mn ;
- anions : NO_3, PO_4, SO_4, Cl, HCO_3.

La concentration en chlorures caractérise le pouvoir corrosif de l'eau vis-à-vis de l'acier.

On peut également caractériser l'eau par des indicateurs calculés à partir de la chimie de l'eau qui permettent de représenter la stabilité de l'eau, sa nature agressive ou entartrante.

Copyright © 2014 Dunod.

Le **titre hydrotimétrique** (dureté de l'eau, °F) indique le pouvoir incrustant de l'eau, c'est-à-dire la capacité des carbonates à précipiter et à former des dépôts :

- eau faiblement minéralisée : titre hydrotimétrique < 22 °F ;
- eau moyennement minéralisée : 22 °F < titre hydrotimétrique < 32 °F ;
- eau fortement minéralisée : titre hydrotimétrique > 32 °F.

9.2.5 Techniques de forage

Extrait du Guide d'application de l'arrêté interministériel du 11 septembre 2003 relatif à la rubrique 1.1.0 de la nomenclature eau.

Un forage peut être effectué en employant diverses méthodes de forage adaptées aux conditions des terrains rencontrés. Le choix technique dépend de plusieurs paramètres :

- les caractéristiques géologiques des terrains : roches dures et massives, roches tendres et friables… ;
- la profondeur à atteindre ;
- le diamètre souhaité.

On peut notamment distinguer les techniques suivantes : le havage, le battage, le rotary, la tarière, le marteau fond de trou.

Le havage consiste à creuser le terrain à la base du tubage en position verticale.

Le tubage s'enfonce sous l'effet de son poids. Cette technique est limitée à des ouvrages peu profonds.

Le battage consiste à briser la roche en laissant régulièrement tomber un outil (le trépan). Ce procédé ancien est utilisé en formations dures calcaires et dolomies. Un tubage de travail est utilisé pour protéger les parois du terrain. Les déblais sont récupérés avec une cuillère.

Le rotary est une méthode par rotation et broyage. Les déblais sont entraînés vers la surface par la circulation d'un fluide de forage, en général de la boue de forage, dans l'espace annulaire entre le terrain et le train de tiges. La boue en surface est tamisée et reprise par une pompe pour être réintroduite dans le train de tige. La boue de forage est adaptée au terrain traversé en jouant sur ses principales caractéristiques : densité et viscosité. Cette technique est utilisée pour les terrains qui ne se tiennent pas : argile, sable, graviers…

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

La tarière est une vis sans fin permettant de forer en gros diamètre à faible profondeur. Cette technique est utilisée en forage de reconnaissance dans les limons, argiles, marnes ou craie… jusqu'à 25 mètres de profondeur environ avec des diamètres compris entre 150 mm et 600 mm.

Le marteau fond de trou fonctionne à l'air comprimé par percussion d'un taillant. Il est utilisé en terrain dur et fissuré : roches carbonatées, cristallines ou volcaniques… L'avancement peut être rapide : 100 mètres en 1 ou 2 jours.

Le tubage à l'avancement consiste à enfoncer un tube au fur et à mesure de l'avancement de la foration. L'association marteau fond de trou et tubage à l'avancement permet de conserver les avantages de la technique de forage dans des terrains instables. La méthode de tubage à l'avancement permet l'observation précise des terrains traversés en offrant la possibilité de remonter le tubage à volonté pour les tests de qualité et de débit des couches rencontrées.

9.2.6 Tubages et crépines

Les tubages sont soit en acier, soit en PVC.

Les tubages en acier sont résistants mais ils peuvent être corrodés par l'eau. Les aciers inoxydables ont un coût élevé. On doit veiller à l'homogénéité de l'acier utilisé pour les tubages et les crépines sous peine de voir apparaître un effet de pile pouvant entraîner des dommages importants au matériel tubulaire.

Les tubages en PVC sont très utilisés en raison de leur résistance à la corrosion, du coût plus faible que pour l'acier, de la facilité de manipulation et d'assemblage des éléments de tubage ou de crépine. Les éléments sont vissés ou collés. Cependant, ils ne peuvent pas être utilisés pour les forages profonds.

Les crépines ont pour fonction d'assurer la production d'eau sans venue de sable en induisant des pertes de charge minimales. Les types de crépines sont déterminés suivant la forme et le pourcentage de vides pour allier résistance et vitesse de l'eau dans les ouvertures.

9.2.7 Configurations forages

En nappe libre (*figure 9.3a*), le forage est réalisé en une seule étape et un seul diamètre. En nappe captive (*figure 9.3b*), il est réalisé en deux étapes et diamètres dégressifs.

Copyright © 2014 Dunod.

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

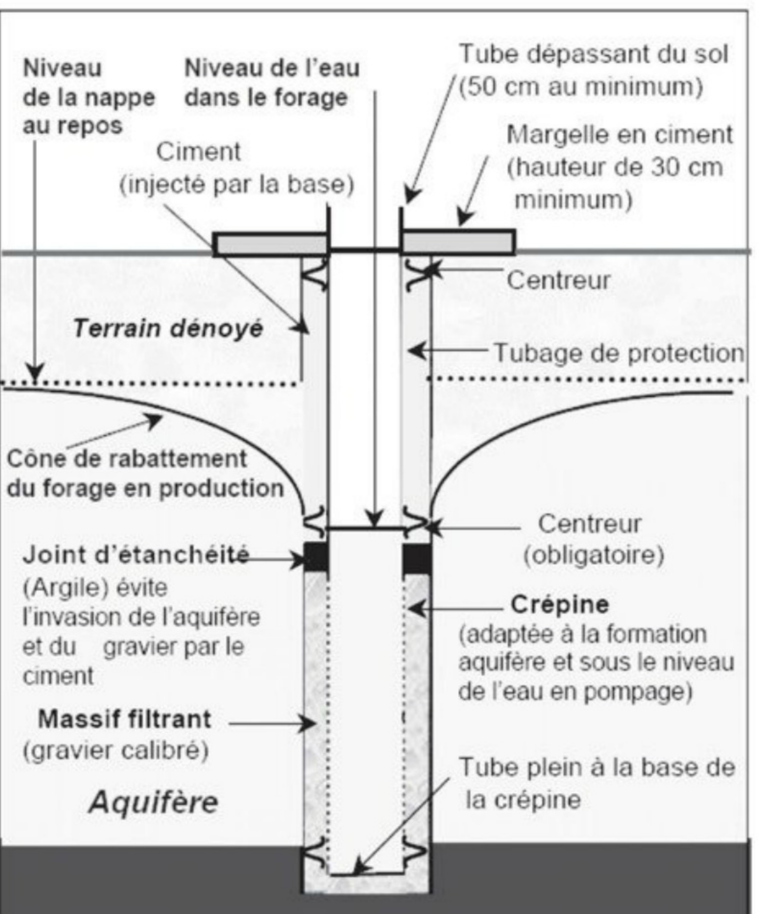


Figure 9.3a – Forage en nappe libre réalisé en une seule étape

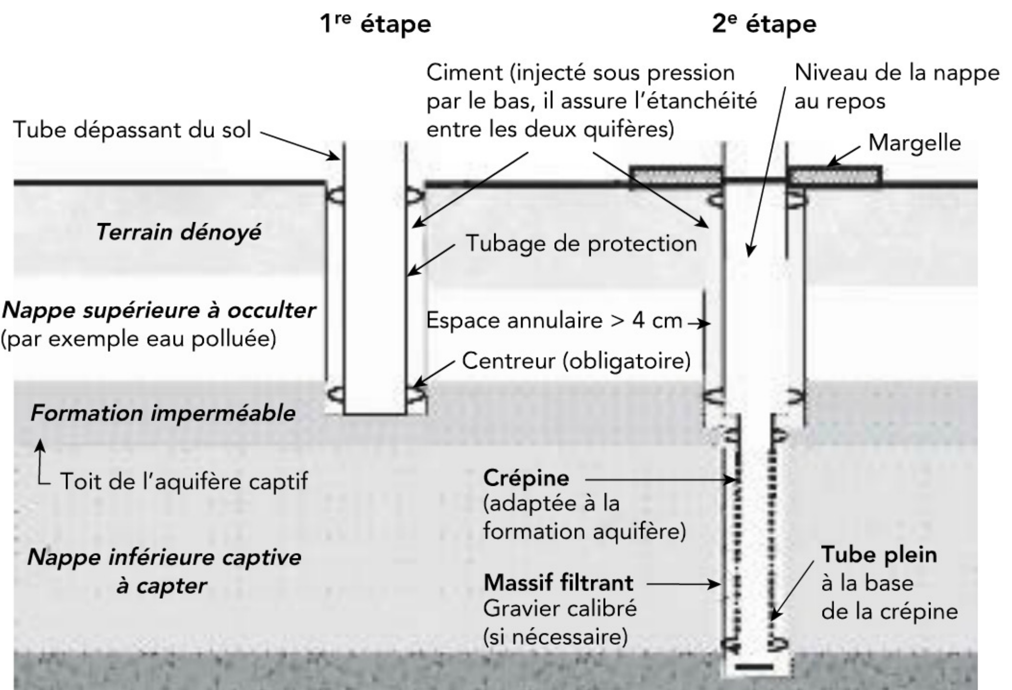


Figure 9.3b – Forage traversant une nappe libre et captant une nappe captive

(Source documentaire BRGM : d'après la plaquette « Des forages de qualité en région Centre »)

Une fois les tubages mis en place, on procède à une cimentation de l'espace annulaire afin d'ancrer définitivement le tubage au terrain. La cimentation a également pour but d'éviter l'infiltration d'eau depuis la surface ainsi que la communication entre des nappes de niveaux différents.

9.2.8 Pompage

Le pompage dans une nappe aquifère s'accompagne d'une baisse de la surface piézométrique de la nappe. Ce phénomène illustré dans la *figure 9.4* est désigné sous le terme de rabattement. L'abaissement du niveau sera d'autant plus important que le débit extrait sera élevé.

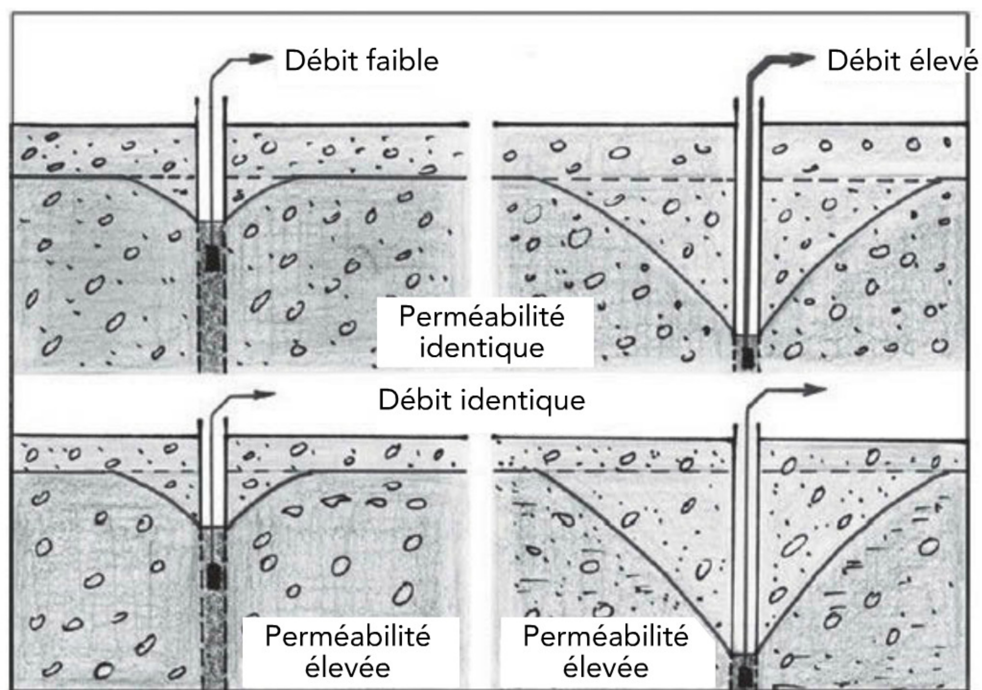


Figure 9.4 – Relations perméabilité, débit, rabattement dans un captage (source documentaire BRGM)

La pompe à installer sera fonction des caractéristiques hydrogéologiques et du débit maximum possible. Pour les nappes à faible profondeur, une pompe de surface peut être envisagée (le niveau ne doit pas descendre en dessous de 7 m). Pour obtenir des débits à des profondeurs plus importantes, on utilise une pompe immergée. La pompe immergée doit être située à une profondeur qui doit toujours se situer au-dessous du niveau de rabattement. La pompe est entraînée par un moteur électrique situé sous la partie hydraulique de la pompe et suspendue à une colonne d'exhaure (*figure 9.5*). La HMT de la pompe doit être supérieure à la distance entre le niveau de rabattement le plus bas et la surface et intégrer les pertes de charge.

Copyright © 2014 Dunod.

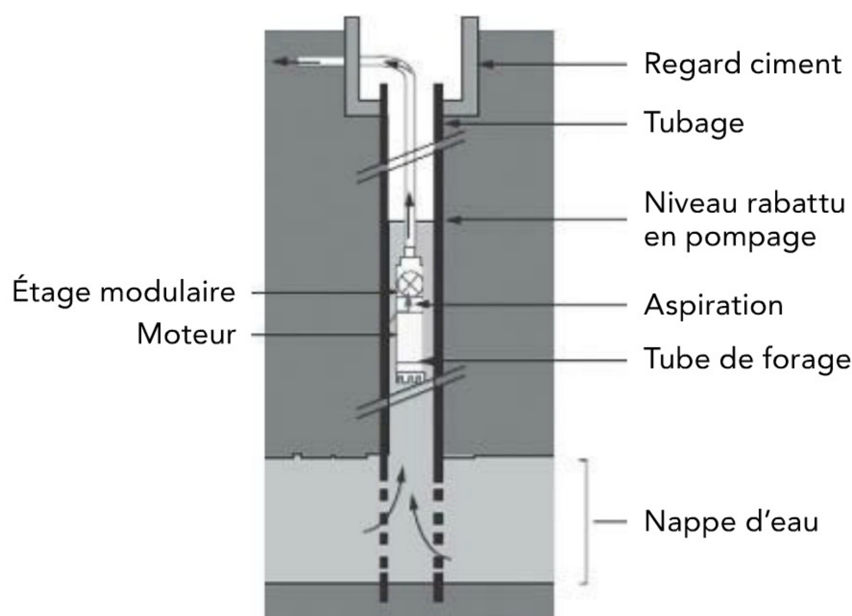


Figure 9.5 – Dispositif de pompage

Une pompe de forage fonctionnera d'autant mieux qu'elle sera proche de son débit nominal (voir *figure 9.6*)

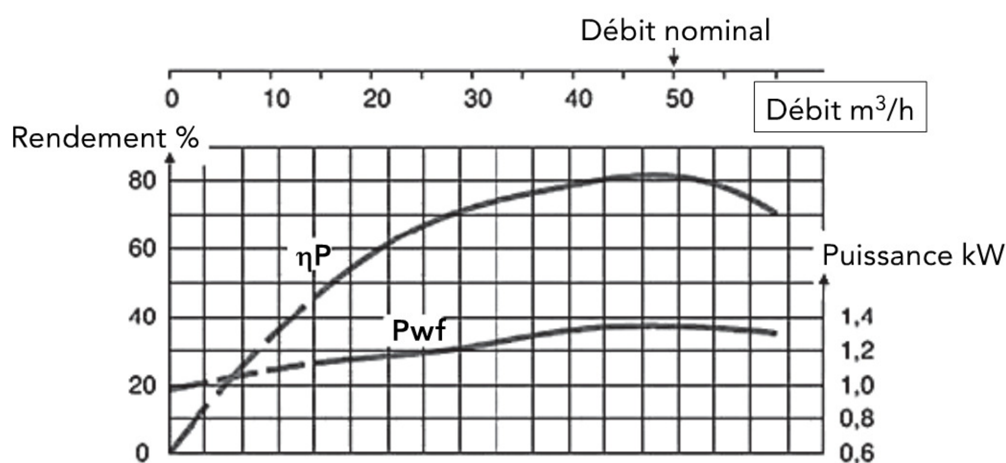


Figure 9.6 – Débit nominal d'une pompe de type SALMSON S4.09 de débit nominal 50 m^3/h

En réinjection, selon la piézométrie et la nature géologique de la nappe une pompe de réinjection pourra s'avérer nécessaire. Dans des formations sableuses, des difficultés de réinjection peuvent être rencontrées nécessitant au-delà de certains débits, deux forages de réinjection pour un forage de production.

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

9.2.9 Mise en œuvre d'une installation PAC sur nappe

Le principe d'une PAC sur aquifère (*figure 9.7*) consiste, à partir d'un puits de production, à prélever un débit d'eau à la température de l'aquifère et d'y prélever des calories en abaissant la température au niveau de l'évaporateur de la pompe à chaleur (en mode chauffage).

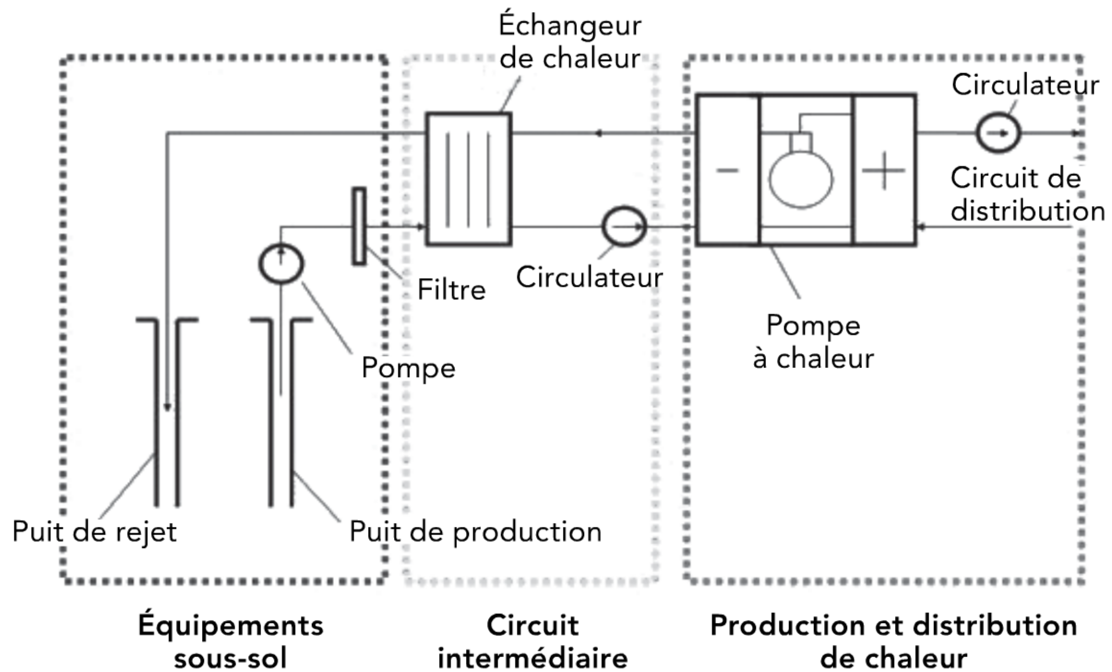


Figure 9.7 – Configuration des ouvrages

Pour évacuer l'eau épuisée thermiquement, plusieurs solutions sont envisageables :

- rejet en surface et infiltration par tranchées ;
- rejet dans un cours d'eau à proximité ;
- rejet dans un réseau d'eau pluviale ;
- rejet dans un réseau d'assainissement ;
- réinjection dans la nappe.

Un rejet dans un cours d'eau à proximité nécessite des autorisations et peut poser des problèmes en cas d'étiage notamment si la PAC fait du refroidissement. Le rejet en rivière est toléré lorsque le prélèvement a lieu en nappe alluviale qui communique directement avec le cours d'eau.

Le rejet dans un réseau d'assainissement est à proscrire et de toute façon redevable de taxes.

La solution généralement retenue est la solution avec deux forages (doublet) : un forage de production et un forage de réinjection.

Copyright © 2014 Dunod.

La réinjection doit se faire dans la même nappe que celle de production. La disposition entre les deux puits doit tenir compte de l'écoulement de la nappe pour éviter l'arrivée prématurée du front froid. La distance pour les nappes peu profondes se situe dans une fourchette de 100 à 250 m. Pour des prélèvements importants, l'implantation doit être validée par une modélisation.

Lorsque la PAC sur aquifère doit satisfaire à la fois les besoins de chaud l'hiver et les besoins de froid l'été, on peut avoir à faire à deux configurations de doublet de forage :

Le fluide de l'aquifère circule toujours dans le même sens, un seul puits est équipé d'une pompe de production (*figure 9.8*).

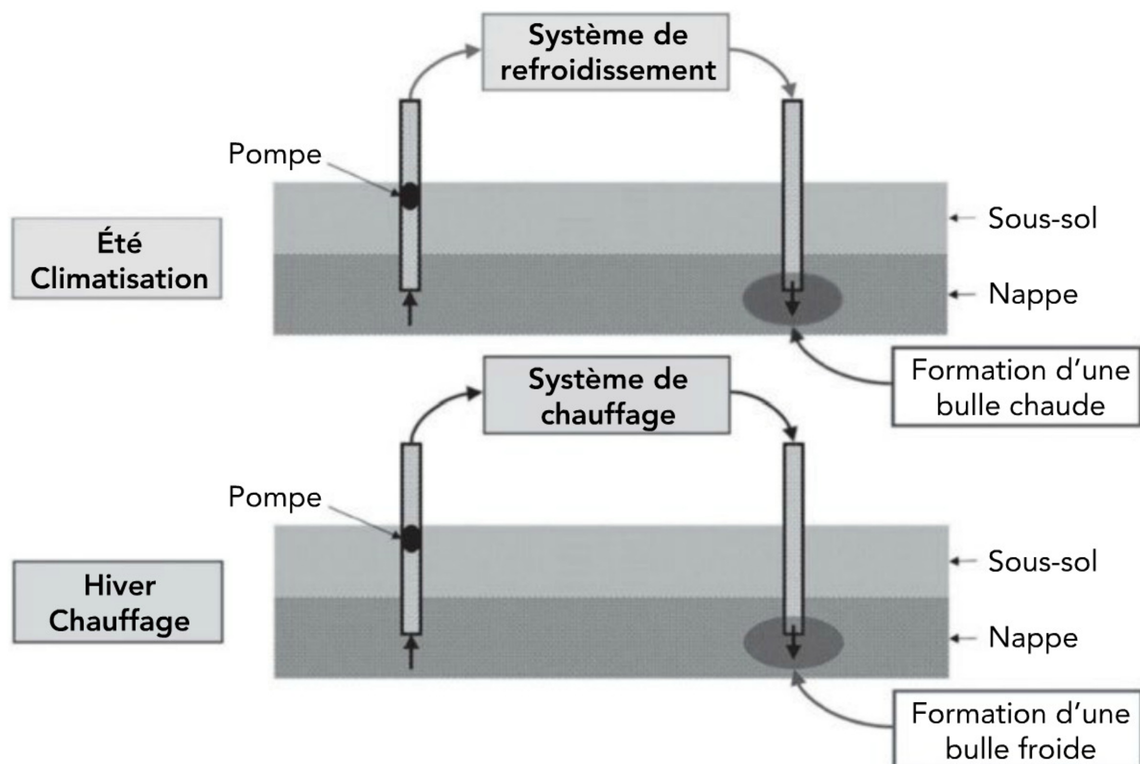


Figure 9.8 – Doublet avec PAC réversible (sens unique)

La deuxième configuration consiste à équiper les deux puits d'une pompe de production. En hiver, la boucle fonctionne dans un sens et il se crée une bulle froide à la réinjection. En été, on inverse le sens de circulation, il y a prélèvement dans la bulle froide et création d'une bulle chaude au puits de réinjection (production hiver). Ce principe, désigné sous l'appellation « puits chaud-puits froid » (*figure 9.9*), permet d'améliorer dans le temps la performance énergétique (sous réserve que l'hydrodynamisme de la nappe ne soit pas important).

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

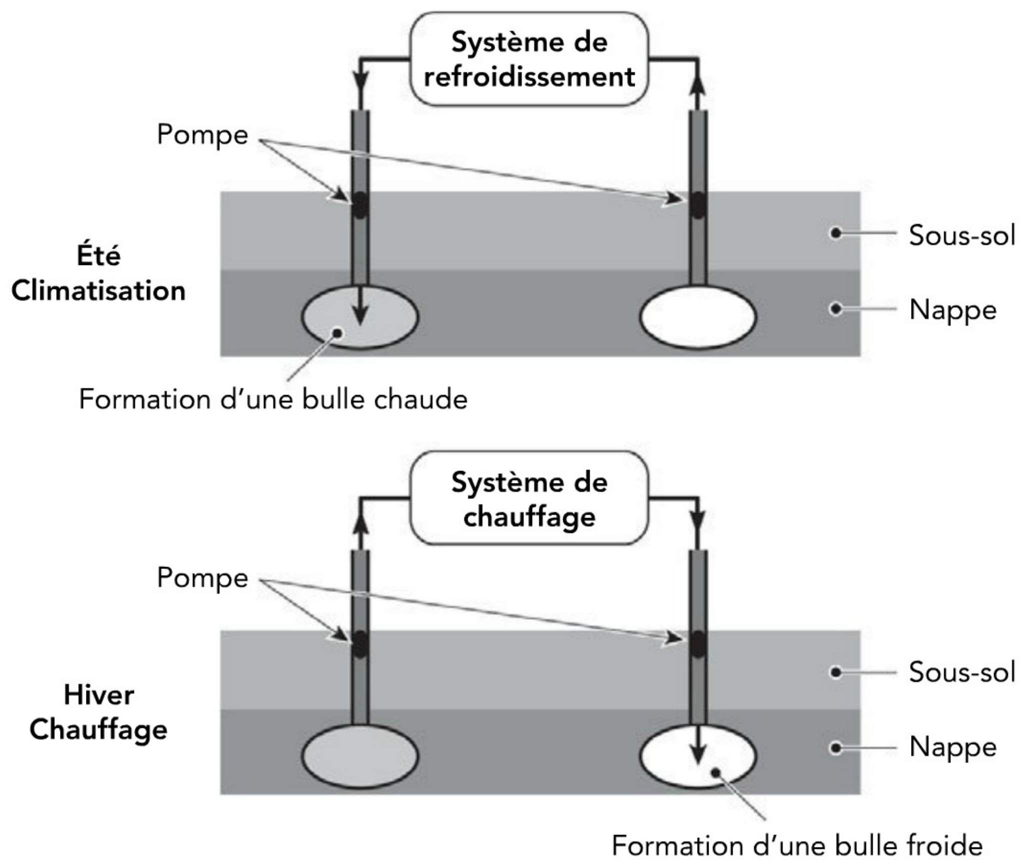


Figure 9.9 – Schéma de principe d'un « puits chaud – puits froid »

Fonctionnement en *free cooling* (*geocooling*)

À partir d'un aquifère peu profond à une température inférieure à 16–18 °C, le fonctionnement en *free cooling* (*figure 9.10*) est possible pour assurer le rafraîchissement de manière directe en court-circuitant la PAC. Cet usage ne peut se concevoir que si le bâtiment est équipé d'un plancher chauffant-rafraîchissant. Cela est également possible sur un bâtiment équipé de ventilos-convecteurs dont la batterie froide est dimensionnée en conséquence et si la température de l'aquifère ne dépasse pas 12-13 °C. Ce rafraîchissement est quasi gratuit, la seule dépense d'énergie est l'énergie de pompage.

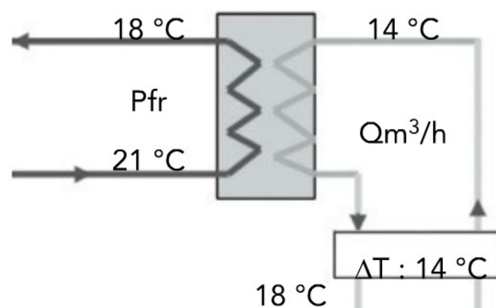


Figure 9.10 – Principe du *geocooling*

Copyright © 2014 Dunod.

9.2.10 Dimensionnement

En mode chauffage :

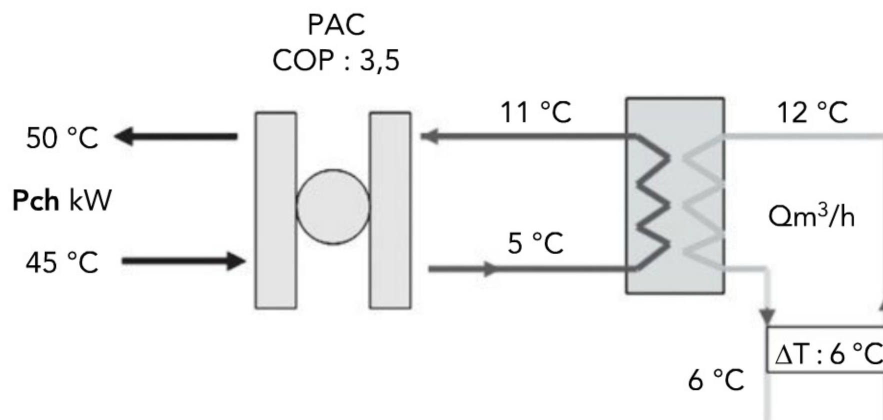


Figure 9.11 – Exemple de fonctionnement en mode chauffage

Débit maxi :

$$Q\ m^3/h = Pch \times (1\text{-}1/COP) / 1{,}16 \times \Delta T$$

Ou ΔT est l'écart entre la température de l'aquifère et la température de rejet.

$$Pev = 1{,}16\ Qm3/h \times \Delta T \text{ (puissance prélevée dans la nappe)}$$

$$Pch = Pev + W$$

$$COP = Pch / W$$

Application : Avec un débit de 50 m^3/h et un ΔT de 6 °C, la puissance disponible à la sortie de la PAC est de l'ordre de 500 kW thermique.

En mode rafraîchissement (PAC réversible)

En mode rafraîchissement (*figure 9.12*), le fonctionnement est inversé au niveau de la PAC réversible. L'évaporateur devient condenseur et le condenseur devient évaporateur.

La puissance prélevée dans la nappe est égale à :

$$Pch = Pfr + W$$

$$Pch = Pfr \times (1 + 1 / EER)$$

Débit rafraîchissement :

$$Qm^3/h = Pfr \times (1 + 1 / EER) / 1{,}16\ \Delta T$$

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

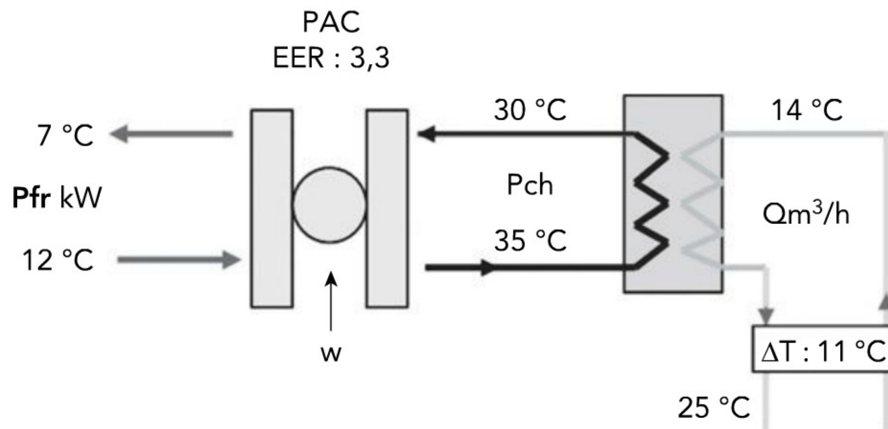


Figure 9.12 – Exemple de fonctionnement en mode rafraîchissement

Règles de dimensionnement

Pour les opérations de taille importante, il est souvent plus intéressant, d'un point de vue économique, de dimensionner l'opération pour assurer environ 50 % de la puissance par la PAC. Avec une puissance égale à 50 % de la puissance maximale, il est possible d'assurer de 80 à 90 % des besoins de chauffage.

Ce principe de dimensionnement est d'autant plus valable si l'obtention de la puissance maximale nécessite un investissement de forage supplémentaire.

Lorsque la PAC doit assurer les besoins de chaud et de froid, la puissance froide, si elle est supérieure à la puissance chaude, est en général dimensionnante, ce qui évite d'avoir à prévoir une machine frigorifique supplémentaire.

Le coût d'un forage est relativement peu influencé par le débit qui en sera extrait. Ce constat a une importance fondamentale sur l'économie d'un projet lorsque le débit est faible ou si les besoins à satisfaire sont insuffisants.

Réglementation

La réglementation concernant la réalisation d'un forage est assez complexe, elle est en cours de révision.

Elle est encadrée par différents codes, en particulier par le code minier et le code de l'environnement (loi sur l'eau) et le code de la santé publique.

Sous réserve de réglementations locales plus strictes, le **code minier** implique :

- la déclaration de tout forage supérieur à 10 m de profondeur ou de débit supérieur à 8 m^3/h ;

Copyright © 2014 Dunod.

- une autorisation (donc enquête publique avec établissement d'un document d'incidence) pour tout ouvrage si l'un des critères suivants est obtenu :
  - profondeur supérieure à 100 m,
  - prélèvement annuel supérieur à 200 000 m^3,
  - débit de réinjection supérieur à 80 m^3/h.

Le **code minier** est géré par la DRIRE ou DREAL.

Le **code de l'environnement** (loi sur l'eau) s'applique en cas de prélèvement d'eau (donc ne concerne pas dans le cas des sondes géothermiques).

Une déclaration est nécessaire si le prélèvement est « supérieur à 1 000 m^3/an mais inférieur ou égal à 80 m^3/h ». Une autorisation est exigée pour tous « prélèvements situés à l'intérieur du périmètre de protection rapproché d'un captage en eau potable » et/ou « si le débit prélevé est supérieur à 80 m^3/h ».

Dans chaque département, il existe une structure auquel les porteurs de projets peuvent s'adresser : il s'agit de la MISE (Mission Inter-Service de l'Eau). Cette structure a pour mission de coordonner les différents services de l'État concernés : DDASS, DREAL, DDAF…

Dans certains cas, l'Agence de l'eau doit être contactée, elle peut exiger des taxes de prélèvement et/ou de rejet.

Le **code de la santé publique** s'applique dans le cas particulier où les eaux du forage géothermique seraient utilisées également pour l'alimentation en eau potable ou dans l'industrie agroalimentaire.

Risques géologiques

Lors de la réalisation d'un forage, le risque de ne pas trouver la ressource escomptée existe (débit et température) mettant en péril l'économie du projet.

Pour limiter ce risque financier, les pouvoirs publics ont mis en place une procédure de garantie appelée AQUAPAC.

Cette procédure intervient non seulement dans la phase de recherche, mais également en cours d'exploitation (garantie de pérennité).

Le détail de la procédure figure en annexe 3.

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

Copyright © 2014 Dunod.

Copyright © 2014 Dunod.

10 Capteurs horizontaux

Les capteurs horizontaux permettent d'exploiter la chaleur géothermique à très faible profondeur. Ces capteurs sont disposés en réseau de tubes horizontaux installés en boucles et enterrés à une profondeur allant de 60 cm à 1,20 m qui vont permettre le prélèvement de l'énergie contenue dans le proche sous-sol *via* un fluide caloporteur circulant dans les tubes.

Cette énergie est essentiellement apportée par les conditions climatiques, soleil, vent, précipitations, d'où l'appellation parfois utilisée de « capteurs géosolaires ».

Généralement, la surface de terrain à mobiliser pour installer le capteur doit correspondre à 1,5 à 2 fois la surface habitable à chauffer. Cette surface va en diminuant avec les nouvelles réglementations.

On distingue plusieurs technologies mettant en œuvre la captation de chaleur avec des capteurs horizontaux.

10.1 Les PAC à détente directe

Le fluide frigorigène circule directement dans les capteurs qui constituent en quelque sorte l'évaporateur de la PAC. Côté utilisation, ce sont les émetteurs de chauffage qui constituent le condenseur de la PAC ; le fluide frigorigène circule dans les planchers (*figure 10.1*). Ce type de pompes à chaleur, en raison de l'absence d'échangeurs, a un meilleur rendement que le système à fluides intermédiaires et nécessite donc des longueurs de capteurs plus faibles. De plus, il n'y a pas besoin de circulateur. En revanche, ce système exige beaucoup de fluide frigorigène, ce qui peut être néfaste pour l'environnement en cas de fuites. Par ailleurs, il admet difficilement la réversibilité si celle-ci se fait par plancher.

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

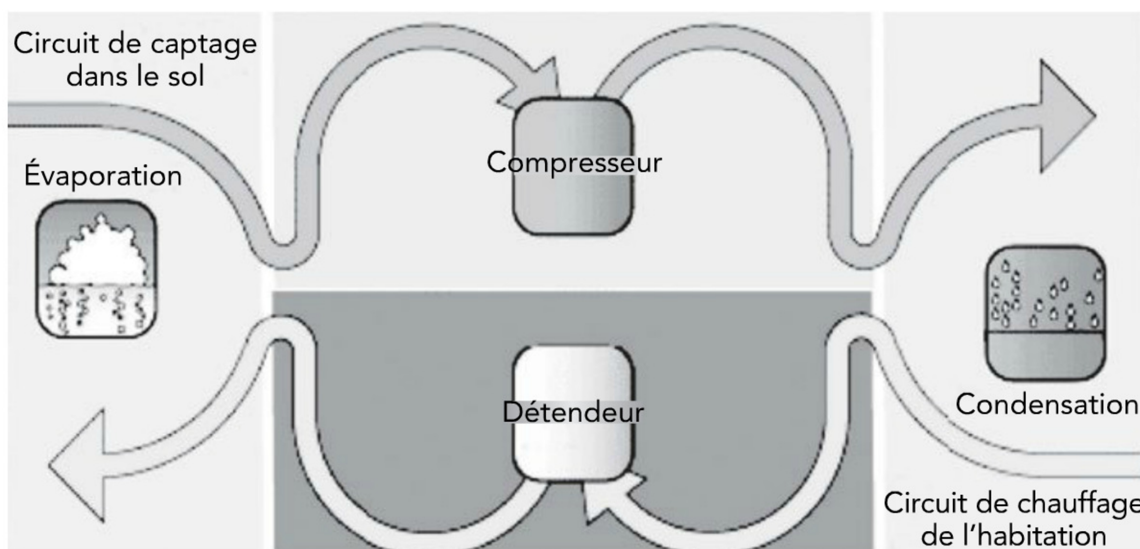


Figure 10.1 – Procédé à détente directe ou « sol-sol »
(source guide ADEME)

10.2 Les PAC à fluides intermédiaires (eau glycolée-eau)

Elles sont constituées de trois circuits : le circuit frigorifique de la pompe à chaleur, le circuit des capteurs où circule de l'eau additionnée d'antigel et le circuit qui alimente en eau chaude ou froide les émetteurs (*figure 10.2*). Les transferts thermiques entre les sources et la PAC se font par le biais d'échangeurs.

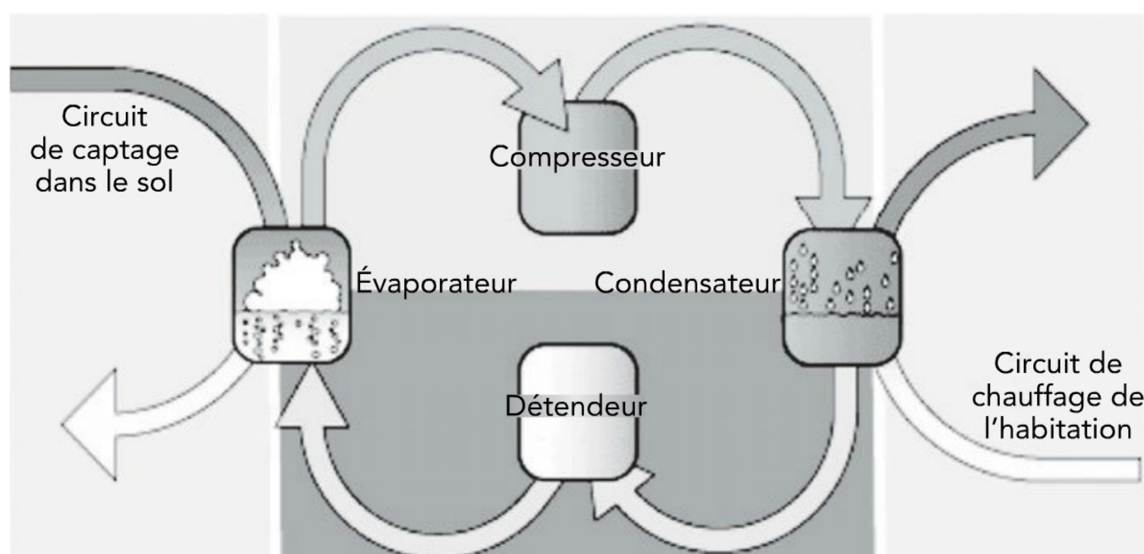


Figure 10.2 – Procédé à fluide intermédiaire ou « eau glycolée-eau »
(source guide ADEME)

Copyright © 2014 Dunod.

10.3 Les PAC mixtes (sol-eau)

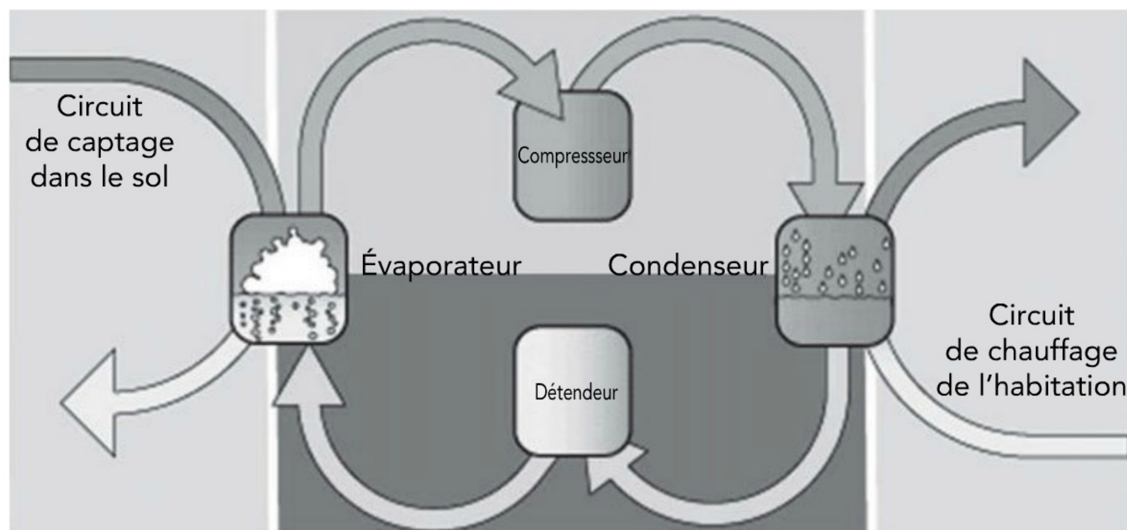


Figure 10.3 – PAC mixte « sol-eau »

L'évaporateur est constitué par les capteurs enterrés dans lesquels circule le fluide frigorigène. L'eau circule dans les émetteurs.

10.4 Mise en œuvre des capteurs

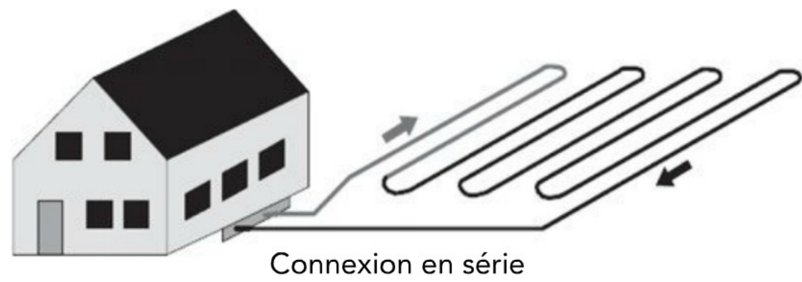
Les capteurs sont constitués par une ou plusieurs boucles de tuyauteries en polyéthylène pour ceux véhiculant de l'eau glycolée, d'un diamètre extérieur d'une vingtaine de mm, disposées à une profondeur d'au moins 60 cm et dans lesquelles on fait circuler en circuit fermé de l'eau glycolée mise en mouvement par un circulateur. Dans le cas des systèmes à détente directe, le fluide frigorigène circule dans des tubes en cuivre de 10 mm de diamètre gainés de polyéthylène.

Le système de captage est connecté à la pompe à chaleur qui transfère, dans le bâtiment à chauffer, la chaleur prélevée dans le terrain.

Les capteurs horizontaux sont installés soit en tranchées, soit en décapage et selon différentes configurations de tubes : 2 tubes, 4 tubes et 6 tubes (*figure 10.5*), avec des profondeurs d'enfouissement et des distances entre les tubes à respecter pour chaque cas.

Les montages des boucles peuvent être en série ou en parallèle (*figure 10.4*).

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.



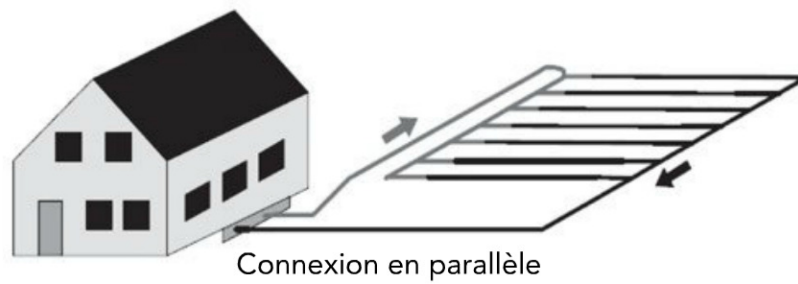
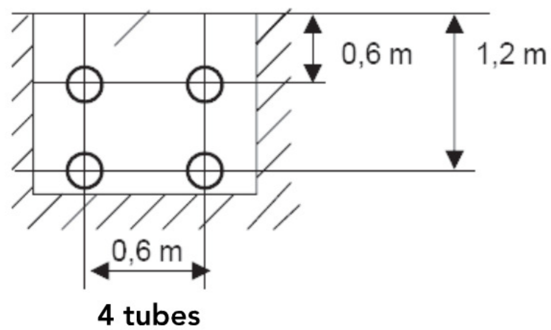


Figure 10.4 – Configurations série parallèle



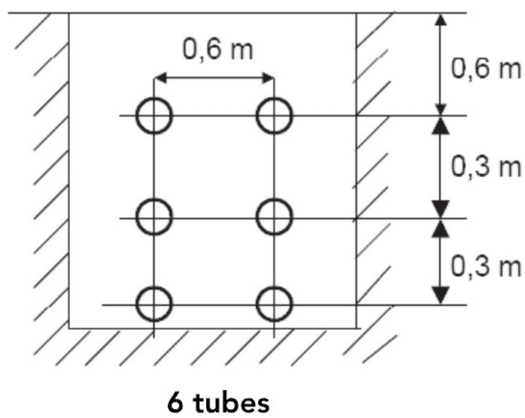


Figure 10.5 – Différentes configurations de capteurs (à 4 tubes et à 6 tubes) installés en tranchées

Copyright © 2014 Dunod.

L'espacement minimal requis entre les tubes et les tranchées horizontales est donné dans le *tableau 10.1* :

Tableau 10.1 – Espacement minimal à respecter

Configuration horizontale	Espacement horizontal entre tubes (m)	Espacement vertical entre tubes (m)	Espacement entre deux trachées d'axe à axe (m)
4 tubes par tranchée	0,6	0,6	1,2
6 tubes par tranchée	0,6	0,3	1,2

Les tranchées sont réalisées soit par une pelleteuse, soit par une excavatrice à chaînes (*figure 10.6*).

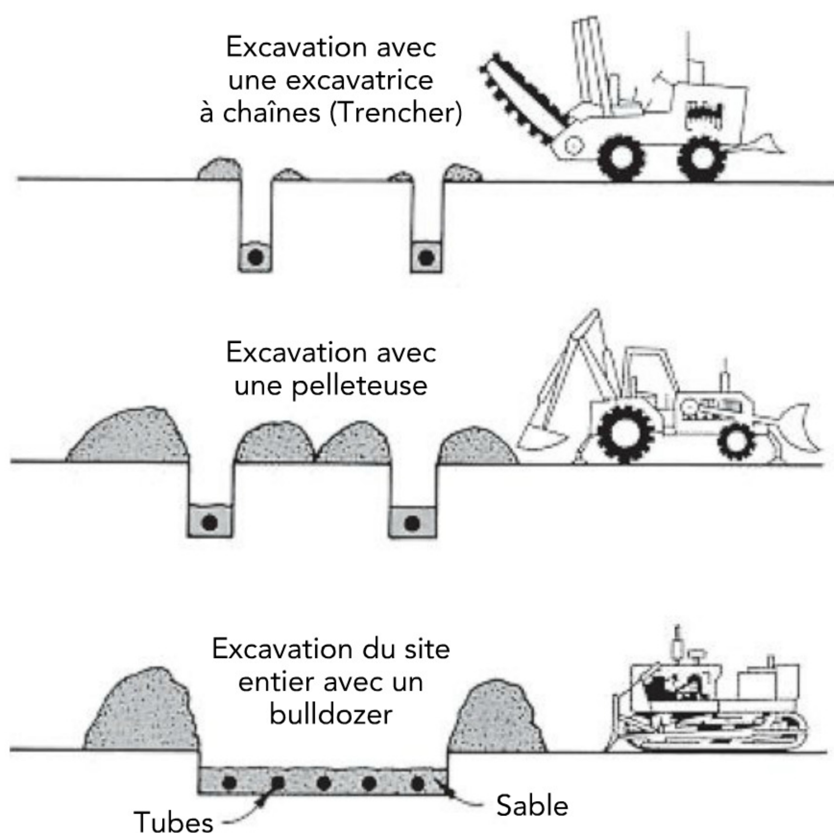


Figure 10.6 – Exécution des tranchées et décapage

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.



Figure 10.7 – Implantation de capteurs après décapage

En décapage, le sol est entièrement décapé sur toute la surface requise pour l'implantation des capteurs et sur une profondeur d'au moins 60 cm. Les tubes sont posés à même le sol, avant remblaiement. L'espace entre les tubes doit être au moins de 40 cm.

Pour une configuration en décapage (*figure 10.8*), le **bulldozer** reste la technique la plus simple d'utilisation.

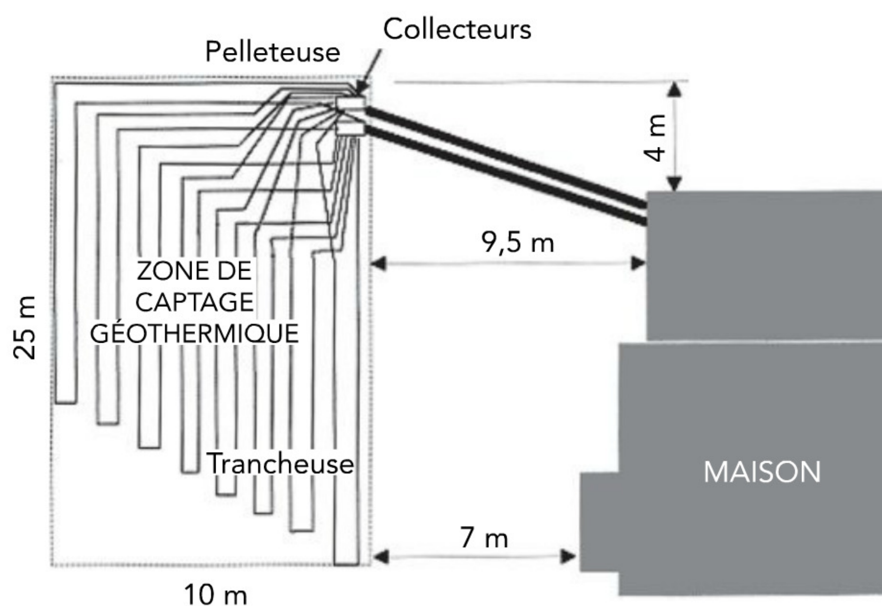


Figure 10.8 – Exemple de plan de captage en décapage

Copyright © 2014 Dunod.

Certaines précautions supplémentaires doivent être prises pour la pose des capteurs.

Ils doivent être éloignés : des arbres **(2 m)**, réseaux enterrés non hydrauliques **(1,5 m)**, fondations, puits, fosses septiques et réseaux d'évacuation **(3 m).** La surface au-dessus du capteur doit être perméable (pas de terrasse et de construction) et ne pas être traversée par des réseaux d'eau (risque de gel). Le terrain ne doit pas être trop pentu. Une pelouse, des massifs de fleurs ou des buissons peuvent par contre être plantés au-dessus des capteurs.

Il est préférable que le terrain utilisé pour le captage soit bien exposé afin de profiter d'une recharge thermique par l'ensoleillement.

Le matériau de remblai doit être un remblai excavé et nettoyé, utilisé jusqu'à au moins 30 cm en dessous du sol. Il doit être exempt de mottes, de roches, de pierres de plus ou de tout autre matériau solide susceptible d'endommager le tuyau dans la tranchée.

Un dispositif avertisseur placé 30 cm au-dessus des capteurs peut éviter des incidents en cas de travaux de terrassements ultérieurs.

Les regards des collecteurs de boucle doivent être accessibles.

Le fluide caloporteur sera composé d'eau et d'un antigel.

La protection à l'antigel est nécessaire pour les systèmes dont la température minimale de la boucle risque d'être inférieure à 5 °C.

Des inhibiteurs de corrosion peuvent éventuellement être ajoutés aux solutions antigel pour réduire l'oxydation des matériaux de la thermopompe.

Divers facteurs doivent être pris en considération pour le choix d'une solution antigel :

- coût du cycle de vie (coût initial de l'antigel et coût de pompage) ;
- fuites ;
- risques pour la santé ;
- risques d'incendie ;
- risques écologiques ;
- risques pour l'usage futur.

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

Les trois types d'antigel utilisables dans les échangeurs de chaleur géothermiques sont :

- le méthanol ;
- l'éthanol ;
- le propylène-glycol.

Le méthanol et l'éthanol sont des produits toxiques et inflammables.

Le propylène-glycol est un glycol de type alimentaire, souvent utilisé comme additif alimentaire. Sa toxicité pour l'être humain et l'environnement est faible ; plus encore, il est peu inflammable. Les propriétés d'échange thermique du propylène-glycol sont légèrement inférieures à celles du méthanol et de l'éthanol.

Les propriétés de ces différents antigels comparées à celles de l'eau sont présentées dans le *tableau 10.2* :

Tableau 10.2 – Propriétés de différents antigels

Propriété à T = 15° C	Point de congélation (°C)	Viscosité (mPa-s)	Chaleur massique (kJ/kg-K)	Conductivité thermique (W/m-k)	Densité (kg/m³)
Eau	0	1,14	4,19	0,59	999,3
Éthanol 15 %	– 6,7	2,23	4,36	0,49	976,7
Éthanol 30 %	– 20,3	3,22	4,20	0,41	957,1
Méthanol 15 %	– 5,1	1,70	4,16	0,51	975,3
Méthanol 30 %	– 25,5	2,11	3,90	0,42	954,0
Prop.-glycol 30 %	– 13,1	3,61	3,91	0,44	1 026

À noter que l'augmentation du pourcentage d'antigel accroît la viscosité du fluide et a donc une incidence sur les besoins énergétiques des pompes de circulation du fluide.

Pour les systèmes à détente directe, le fluide frigorigène doit être bien réparti dans les boucles. Les terrains en pente peuvent poser des problèmes de bouchons liés à l'accumulation de l'huile issue du compresseur dans les parties basses du captage.

Copyright © 2014 Dunod.

10.5 Dimensionnement

Le dimensionnement correct de l'échangeur souterrain est fondamental pour assurer un fonctionnement technique et économique optimisé.

Il y a deux éléments principaux qui contraignent le dimensionnement des capteurs qu'ils soient horizontaux ou verticaux.

- la puissance maximale de chauffage qu'il est possible de fournir, pour une courte durée, un jour d'hiver très froid (puissance maximale de réfrigération en été), sans dépasser une chute (une augmentation) acceptable de température du fluide ;
- la stabilité à long terme du système ; ce qui est particulièrement important pour les systèmes fonctionnant en chauffage uniquement, lorsque les transferts naturels dans le sol assurent seuls la recharge thermique.

Un sous-dimensionnement des capteurs peut conduire à un prélèvement trop important de calories dans le terrain, à son assèchement ou à son gel ; la pompe à chaleur peut alors être mise en défaut. Le gel autour des tuyauteries peut constituer momentanément un avantage en matière de prélèvement (amélioration de la conductivité et de la chaleur spécifique). Par contre, le gel peut générer un gonflement du sol et des déformations du terrain en surface.

Le *tableau 10.3* indique des ordres de grandeur des puissances maximales que l'on peut extraire par mètre de tube ou de tranchée et par mètre carré de terrain avec une température d'eau glycolée d'entrée dans le capteur de –3 °C et une température de sortie de 0° C.

Tableau 10.3 – Puissanceextractible en fonction de la nature des roches

Nature du sol	Puissance d'extraction W/m	W/m² - m²/kW 1 boucle	W/m² - m²/kW 2 boucles
Sol sablonneux (sec)	10	20 - 50	25 - 40
Sol argileux (sec)	20	40 - 25	50 - 20
Sol argileux (humide)	25	50 - 20	62 - 16
Sol argileux (saturé d'eau)	30	70 - 14,5	86 - 12

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

La puissance thermique disponible à la sortie de la PAC est égale à la puissance d'extraction multipliée par (1 + 1 / COP), soit 1,3 pour un COP égal à 3,5.

Qualipac fixe une limite de prélèvement à : < 40 W/m^2 et < 15 W/m de tube. Exemple de dimensionnement d'après le logiciel Climastar (J. Bernier) dans la *figure 10.9.*

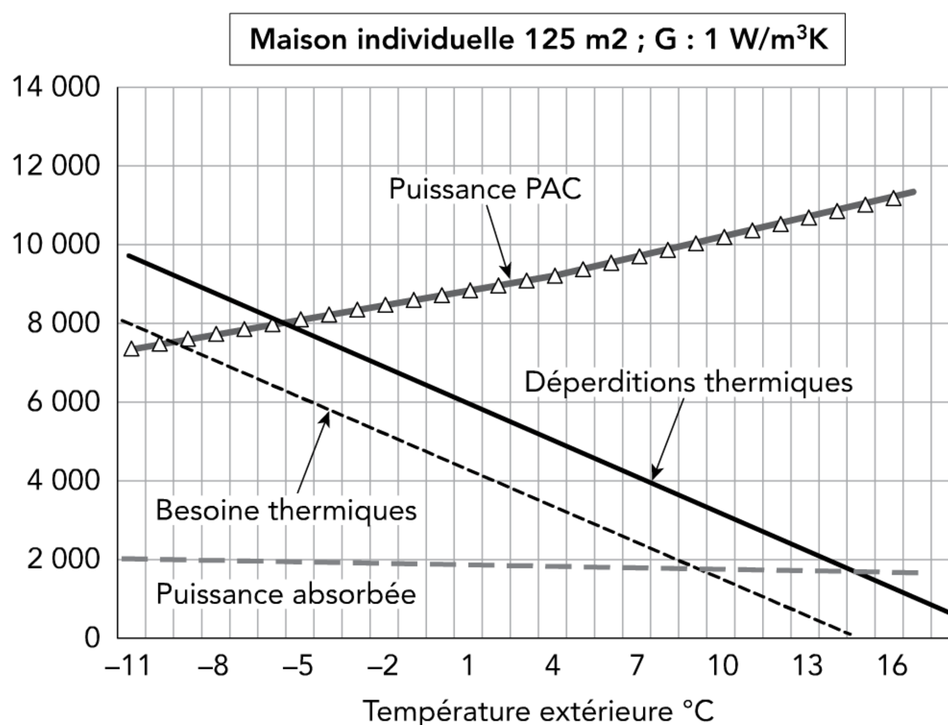


Figure 10.9 – Maison individuelle 125 m² – Captage horizontal sol humide

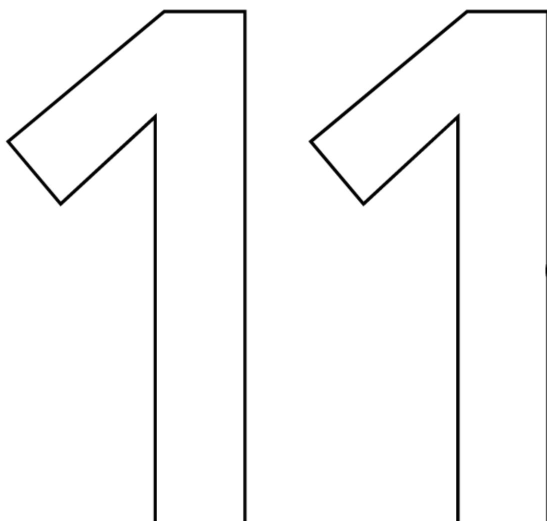
Copyright © 2014 Dunod.

Tableau 10.4 – Feuille de calcul d'après le logiciel Climastar (J. Bernier)

Données	
Surface totale chauffée m²	125
Coefficient global isolation G W/m^3.K	1 000
Température intérieure moyenne	20 °C
Température extérieure de base hiver corrigée	-7 °C
Température départ eau chaude °C	36 °C
Température retour eau chaude °C	31 °C
Rendement distribution/régulation % (définit les pertes)	95 %
Modèle PAC choisi	
Puissance calorifique à-5/35 °C PAC eau glycolée kW	7,32
Puiss. Abs. Auxiliaires asservis compresseur W	46
Puiss. Abs. Auxiliaires permanents W	93
Quantité de fluide frigorigène kg	0,9
Type de fluide frigorigène	R-407C
Surface mini-terrain pour captage m²	125 m^2
Longueur minimale tubes capteur horizontal m	334 m
Longueur de tubes de captage prévue	570 m
Température de non-chauffage t_{nc}	14,5 °C
Besoins calorifiques utiles à tex base	7,1 kW
Déperditions thermiques de base	8,4 kW
Consommation PAC kWh	2 489 kWh
Consommation appoint kWh	0 kWh
Consommation auxiliaire électrique kWh	597 kWh
Consommation totale pompe à chaleur	**3 087 kWh**
Besoins énergétiques annuels satisfaits	12 615 kWh
Économie d'énergie annuelle	75,5 %
Consommation chauffage chaudière gaz	15 768 kWh
Effet de serre global annuel chauffage PAC	685 kg CO_2
Effet de serre global annuel chauffage au gaz	4 100 kg CO_2

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

Copyright © 2014 Dunod.



Capteurs verticaux ou sondes géothermiques

Le captage par échange avec le sol se fait généralement par l'intermédiaire d'1 ou 2 tubes en U descendus dans un forage vertical à des profondeurs allant de 30 à 200 m.

La profondeur des sondes géothermiques permet de s'affranchir des variations de température journalières ainsi que saisonnières et d'exploiter les pompes à chaleur dans de bonnes conditions en hiver, même quand la température de l'air extérieur est très basse.

Contrairement aux capteurs horizontaux, la température du sol est pratiquement constante à partir d'une profondeur de 10 m, elle bénéficie ensuite du gradient géothermique de l'ordre de 3 °C par 100 m.

Cette filière s'applique non seulement pour des maisons individuelles (*figure 11.1*), notamment lorsque la surface du terrain disponible est insuffisante pour des capteurs horizontaux, mais également pour des logements collectifs et ensembles du tertiaire.

Contrairement aux solutions sur aquifères, il est possible de définir le nombre exact de sondes pour assurer la puissance souhaitée. Un test de réponse thermique préalable permettra d'optimiser le nombre de sondes et la rentabilité économique du projet.

La réussite de ce type d'opération nécessite l'intervention de foreurs qualifiés et expérimentés.

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

11.1 Maisons individuelles

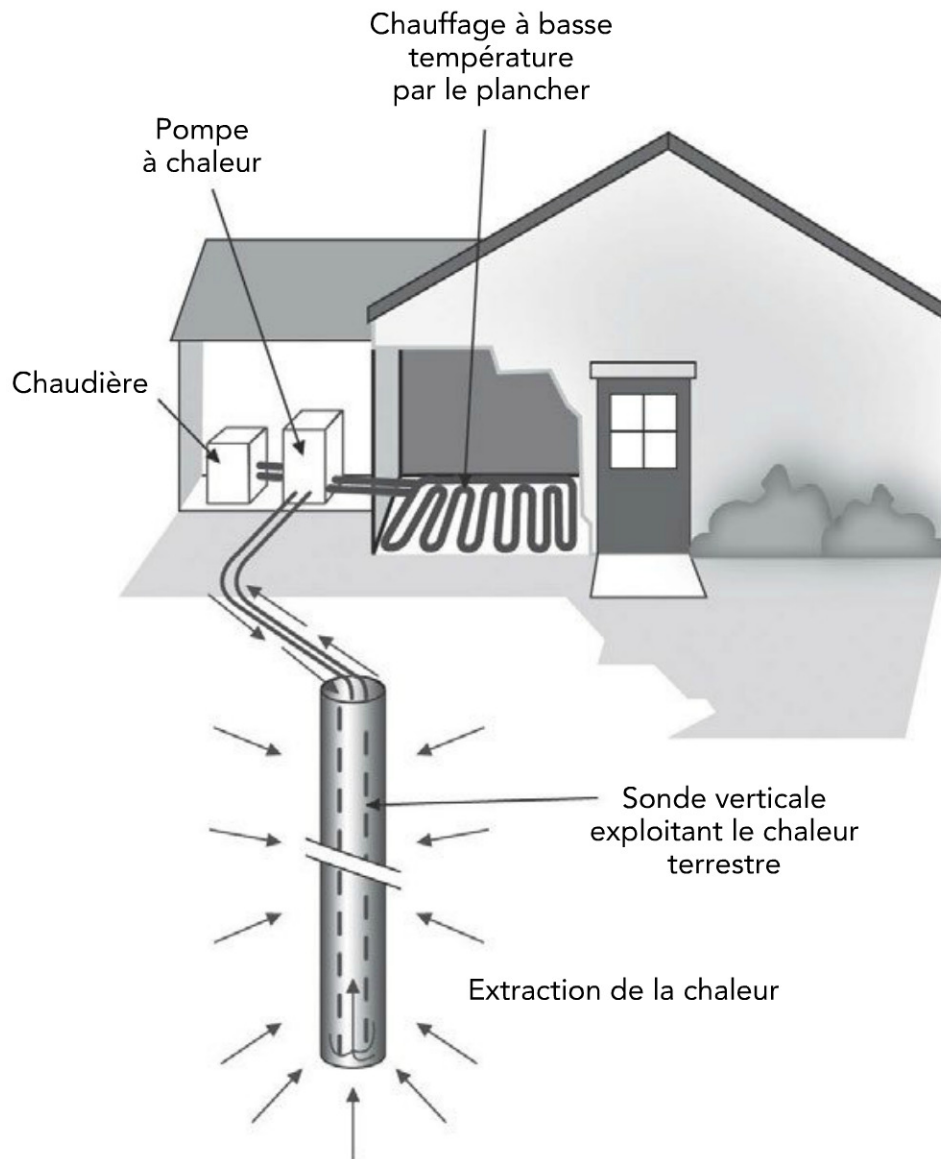


Figure 11.1 – Schéma de fonctionnement d'une sonde géothermique

Le fluide caloporteur est de l'eau glycolée. Un système avec fluide frigorigène pour ce type de capteurs est difficilement envisageable au-delà d'une profondeur de 30 m.

Selon la puissance désirée, un ou plusieurs forages seront réalisés (*figure 11.2*). Contrairement aux capteurs horizontaux, cette technique nécessite une surface de terrain restreinte. Pour une maison individuelle, un, voire deux, forages sont nécessaires. L'intérêt de cette filière est qu'elle peut également s'appliquer à des ensembles plus importants, petits collectifs, immeubles du tertiaire… Il suffit de multiplier le nombre de forages espacés de 6 à 10 m.

Copyright © 2014 Dunod.

Les sondes verticales permettent également la réversibilité et le fonctionnement en géocooling, ce qui présente l'avantage de recharger de manière totale ou partielle le potentiel thermique du sous-sol pendant les périodes estivales.



Figure 11.2 – Machine de forage pour sondes

11.1.1 Mise en œuvre des sondes verticales

La réalisation d'un forage pour y introduire des sondes est une opération qui nécessite le respect des règles de l'art attachées à cette technologie. L'ADEME et le BRGM tiennent à jour la liste des foreurs inscrits dans la démarche « engagement qualité » accessible sur le site **www.geothermie-perspectives.fr.**

Un projet de forage ne peut être bien conçu et bien réalisé que s'il s'appuie sur une bonne connaissance préalable du sous-sol. Il est important de connaître la nature des roches des couches traversées et d'identifier celles qui sont aquifères. L'intervention d'un géologue ou hydrogéologue est généralement recommandée.

Les techniques de forages, comme pour les aquifères peu profonds, dépendent de la nature des couches traversées. En principe, il n'y a pas de mise en place de

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

tubages après forage, sauf de manière temporaire s'il y a nécessité de consolider des formations avant descente des capteurs.

Le diamètre des forages est selon que l'on descende 2 tubes ou 4 tubes de 110 à 125 mm. Les tubes descendus sont en PEHD ; leur diamètre est compris entre 25 et 40 mm. Les tubes sont lestés et descendus par déroulement autour d'un touret. Il s'agit d'une opération délicate notamment lors de la traversée de terrains meubles.

Les tubes en U (*figure 11.3*) sont remplis de liquide, pressurisés et scellés dans les trous de forages. Il est important de pressuriser les tuyaux afin d'éviter qu'ils ne se déforment lors du remblayage.

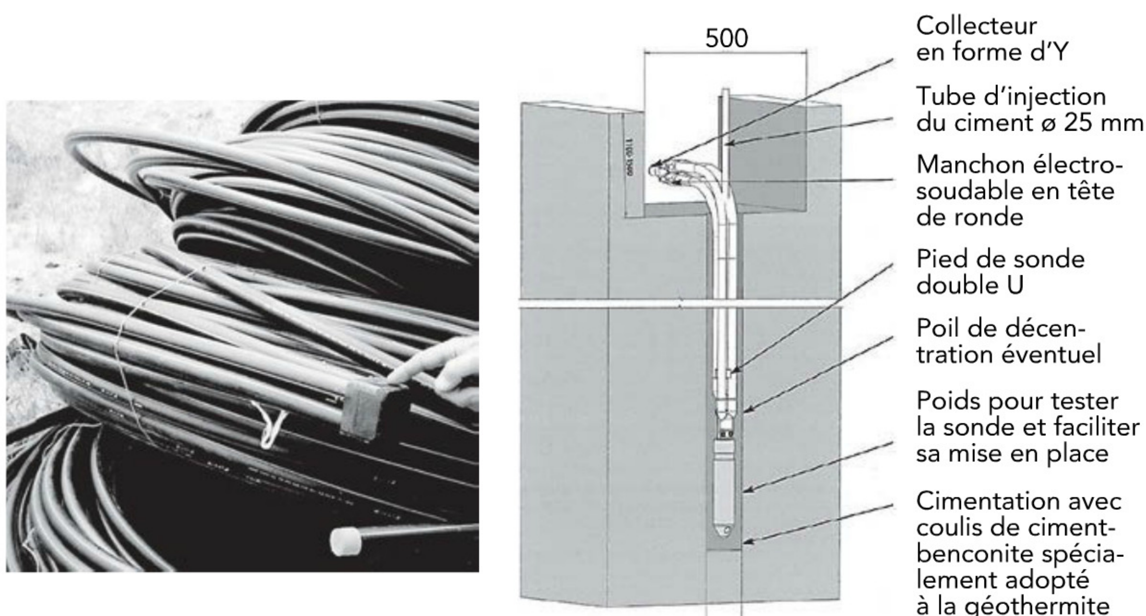


Figure 11.3 – Sondes PEHD en double U

L'opération la plus délicate est le remplissage du puits par un mélange de ciment et de bentonite qui stabilise le trou dans sa géométrie originelle.

Le remplissage des forages se fait à l'aide d'un petit tuyau d'évacuation inséré avec la boucle, en commençant par le fond jusqu'à la surface (injection à la trémie).

La cimentation doit remplir un certain nombre de fonctions :

- éviter les trous d'air qui limiteraient les échanges thermiques ;
- permettre la circulation d'eau lors de la traversée d'aquifères susceptible d'améliorer la recharge thermique ;
- optimiser les échanges thermiques entre les terrains et la sonde ;
- isoler les aquifères traversés afin d'éviter des communications ;

Copyright © 2014 Dunod.

- protéger contre les infiltrations de surface ;
- stabiliser le terrain à long terme.

Si le matériau de remplissage est de conductivité inférieure à celle du terrain, la longueur totale du puits doit être plus grande pour compenser. Les résultats d'une étude canadienne montrent que l'utilisation de la bentonite standard au lieu d'une bentonite de meilleure qualité thermique peut conduire à un accroissement de longueur de 24 % pour le puits.

La conductivité thermique augmente en ajoutant des additifs au coulis de bentonite (calcaire, ciment à maçonner, quartz, silice…).

Les matériaux de coulis thermique à base de bentonite sont disponibles sur le marché ; leur conductivité thermique oscille entre 0,78 et 2,51 W/m · K.

D'après la norme NFX 10970, la conductivité thermique est supérieure ou égale à 2 W/m · K.

Le remplissage au niveau des parties aquifères (*figure 11.4*) peut se faire avec du gravier roulé.

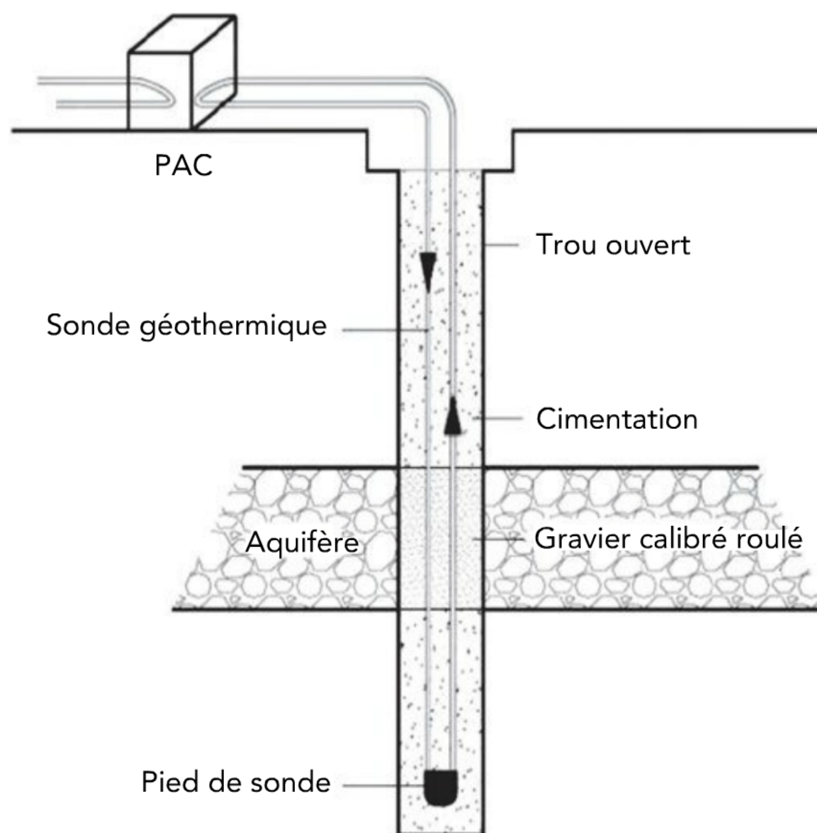


Figure 11.4 – Schéma d'une sonde géothermique (remplissage)

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

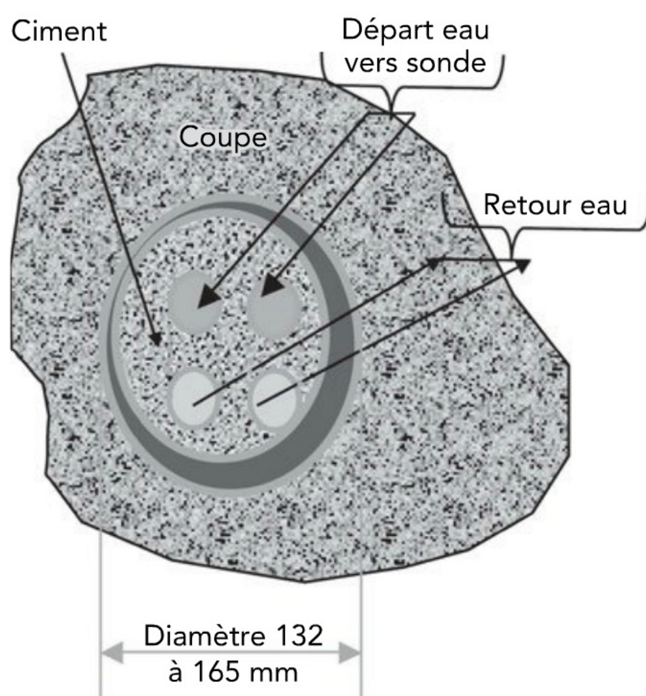


Figure 11.5 – Vue en coupe d'une sonde géothermique verticale en double U

Bien que la technique utilisant les tubes en double U soit actuellement la plus utilisée, d'autres techniques ont été expérimentées : systèmes coaxiaux simples ou complexes illustrés dans la figure *figure 11.6* :

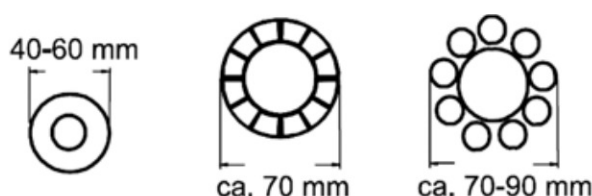


Figure 11.6 – Systèmes coaxiaux

11.1.2 Dimensionnement

Pour dimensionner une sonde ou un champ de sondes, il est important de bien définir les besoins en puissance et consommation (chauffage, ECS, climatisation). Une étude thermique conforme aux exigences de la réglementation thermique doit être réalisée par un bureau d'études spécialisé.

Le dimensionnement des sondes géothermiques, profondeur et nombre, doit être réalisé avec le maximum de rigueur. Le résultat économique d'une opération PAC sur sondes sera très dépendant de cette phase.

Copyright © 2014 Dunod.

Le paramètre essentiel de dimensionnement d'une sonde géothermique est la puissance de prélèvement exprimée en Watt/mètre linéaire (W/ml). La valeur de ce paramètre est fonction de la nature des terrains traversés, de la nature des roches, de la présence d'aquifères, des conditions moyennes et limites d'exploitation.

La traversée de terrains humides améliore la conductibilité thermique et garantit un bon contact entre la sonde et le sous-sol.

Le *tableau 11.1* donne quelques éléments pour un dimensionnement sommaire. Il tient également compte du mode de fonctionnement (durée) de façon à limiter l'épuisement prématuré de la ressource.

Tableau 11.1 – Puissance d'extraction en fonction de la mature du sous-sol

Type de terrain	Conductibilité thermique W/m · K	Puissance d'extraction W/m	
		1 800 h/an	2 400 h/an
Gravier, sable sec	0,4	< 25	<20
Gravier, sable humide	2,0	65-80	55-65
Argile humide	1,7	35-50	30-40
Calcaire massif	2,8	55-70	45-60
Grès	2,3	65-80	55-65
Granite	3,4	65-85	55-70
Basalte	1,7	40-65	35-55
Gneiss	2,9	70-85	60-70

La puissance thermique disponible à la sortie de la PAC est égale à la puissance d'extraction multipliée par (1 + 1 / COP), soit 1,25 pour un COP égal à 4.

En l'absence de données, la valeur moyenne généralement admise est de 50 W/ml.

Une étude géologique permettra d'affiner le résultat dont les données pourront être exploitées à partir d'un logiciel spécifique.

11.2 Test de réponse thermique

Dans le cas d'une application nécessitant plusieurs forages, il est recommandé de réaliser un forage de reconnaissance suivi d'un **test de réponse thermique** (*figure 11.7*).

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

Au cours du forage, des prélèvements seront réalisés et analysés. Une sonde pilote équipée de capteurs de température est ensuite descendue dans le forage.

Le fluide caloporteur à une température donnée est mis en circulation et un relevé des températures entrée et sortie est enregistré. La durée du test est d'environ une semaine.

À l'issue du test, les éléments suivants auront été déterminés :

- température initiale moyenne du terrain (K) ;
- conductivité thermique du terrain (W/m · K) ;
- chaleur spécifique volumique moyenne du terrain (MJ/m^3 · K) ;
- résistance thermique équivalente de la sonde.

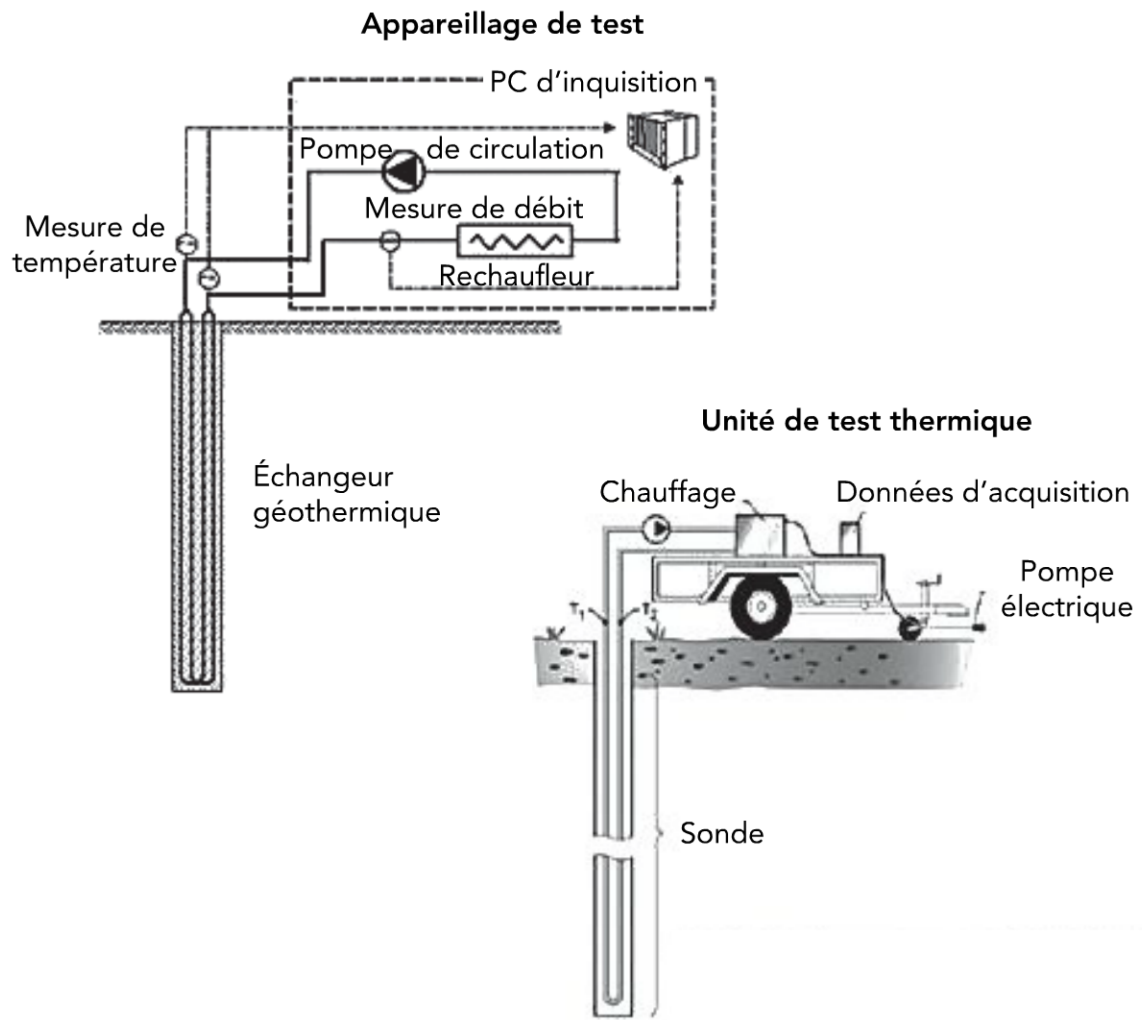


Figure 11.7 – Test de réponse thermique

Copyright © 2014 Dunod.

Le test permet également de relever la géologie et l'éventuelle activité hydrogéologique et ainsi de prévoir la technique de forage appropriée.

Après un laps de temps (~12 h), la courbe représentant l'évolution en fonction du temps de la température moyenne du fluide $T_F = (T_E + T_S) / 2$ suit une loi logarithmique du type :

$$T_F(t) = k \ln(t) + C$$

k : pente de la courbe

C : constante

$$K = P_{th} / 4 \pi\lambda$$

P_{th} : puissance injectée par mètre de sonde (W/m)

Λ : Conductivité moyenne du terrain (W/m · K)

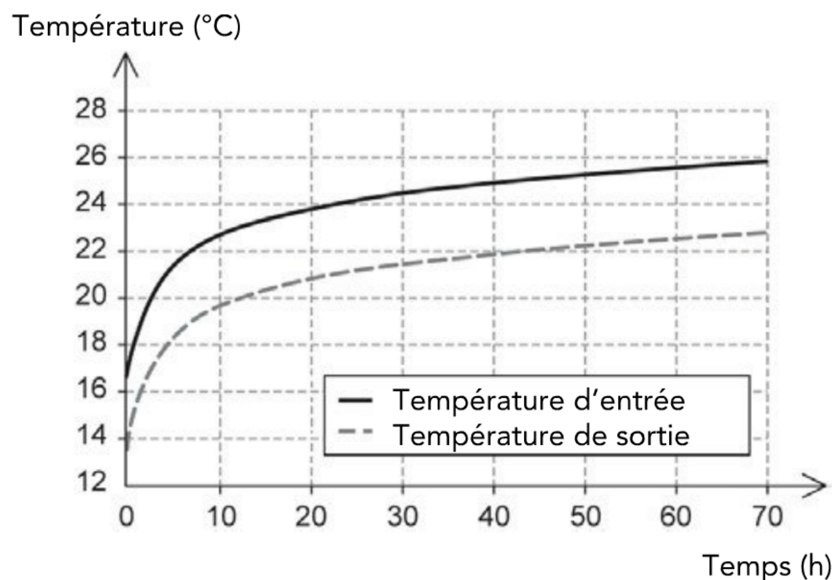


Figure 11.8 – Exemple de résultats d'un test de réponse thermique, source : X therma Energy (Bruno Seguin)

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

11.3 Bilan des consommations d'électricité d'un pavillon équipé de sondes

Étude réalisée par le COSTIC pour ADEME Île-de-France, ARENE, EDF.

Le pavillon concerné a une surface habitable de 188 m², constituée d'un RDC, d'un étage et de combles aménagés.

Le système de chauffage thermodynamique comprend :

- une PAC réversible eau/eau de 8,9 kW ;
- deux sondes verticales de 70 m de profondeur.

L'émission de chaleur et de froid se fait par plancher basse température, sauf au deuxième étage où le chauffage se fait par convecteurs électriques.

Caractéristiques de la pompe à chaleur :

- puissance thermique : 8,9 kW ;
- puissance nominale absorbée : 2,25 kW ;
- débit au condenseur : 1 500 l/h ;
- débit à l'évaporateur : 1 800 l/h .

Conditions nominales de fonctionnement :

- condenseur : 30 °C / 35 °C ;
- évaporateur : 0 °C / 3 °C ;

Auxiliaires :

- pompe évaporateur : 100 W ;
- pompe condenseur : 80 W ;
- résistance additionnelle : 6 kW ;
- ECS : chauffe-eau à accumulation (heures creuses).

Copyright © 2014 Dunod.

11.3.1 Enregistrements

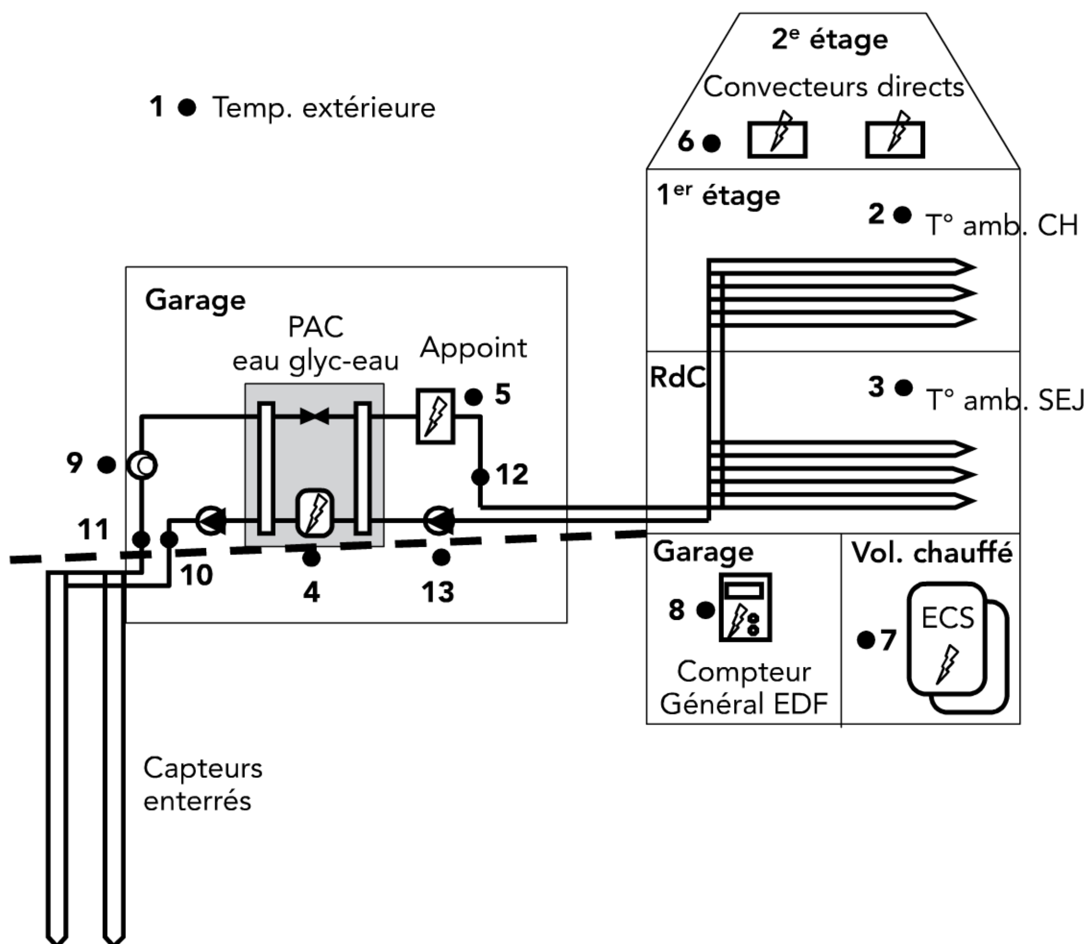


Figure 11.9 – Instrumentation du site (points de mesure)

1. Température extérieure
2. Température ambiante chambre principale
3. Température ambiante séjour
4. Consommation électrique PAC
5. Consommation électrique appoint-secours
6. Consommation électrique convecteurs 2e étage + bains
7. Consommation électrique pour l'ECS
8. Consommation électrique générale
9. Volume d'eau capteurs sol
10. Température aller capteurs sol
11. Température retour capteurs sol
12. Température de départ en plancher
13. Temps de fonctionnement circulateur.

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

Tableau 11.2 – Résultats sur la saison de chauffage 2002-2003

Mois	Consommations en kWh						DJU
	PAC		Ch. direct	ECS	Divers	Total	
	Compresseur	Appoint					
Sept. 2002	151,92	0,00	19,92	311,48	459,74	943,06	89
Oct. 2002	420,42	0,00	0,01	344,85	526,26	1 291,54	178
Nov. 2002	410,00	0,00	3,23	358,49	559,67	1 331,39	264
Déc. 2002	1 151,98	0,00	12,13	340,87	582,57	2 087,55	348
Janv. 2003	1 619,77	0,00	156,60	350,00	616,28	2 742,65	471
Fév. 2003	1 337,48	0,00	0,51	300,00	471,15	2 109,14	398
Mars 2003	632,40	0,01	0,00	350,00	557,95	1 540,36	241
Avril 2003	384,44	0,00	0,00	557,95	474,69	1 257,73	199
Mai 2003	128,84	0,00	0,00	474,69	498,50	1 010,74	128
Total	**6 237,25**	**0,01**	**192,40**	**498,50**	**4 746,81**	**1 4314,16**	**2 316**

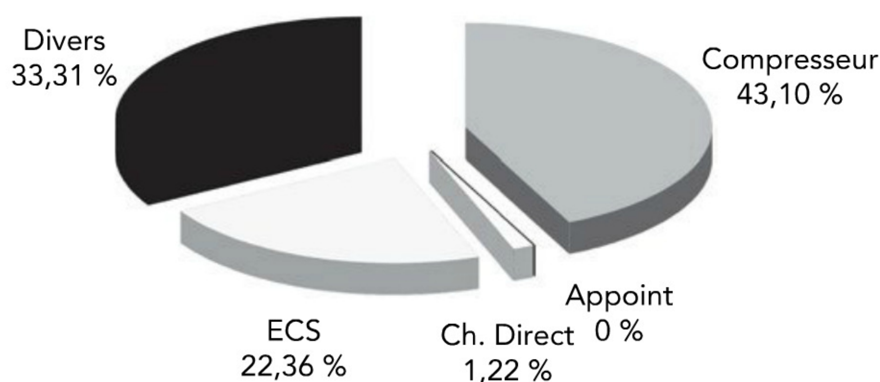


Figure 11.10 – Répartition des consommations d'électricité

Copyright © 2014 Dunod.

Journée caractéristique (froide) d'hiver

La température intérieure est maintenue autour de 21 °C.

L'eau de retour des capteurs est en moyenne de 1 °C, sa température est abaissée à –2 °C environ après son passage dans la PAC.

En régime établi, la température de départ du plancher est aux environs de 38 °C.

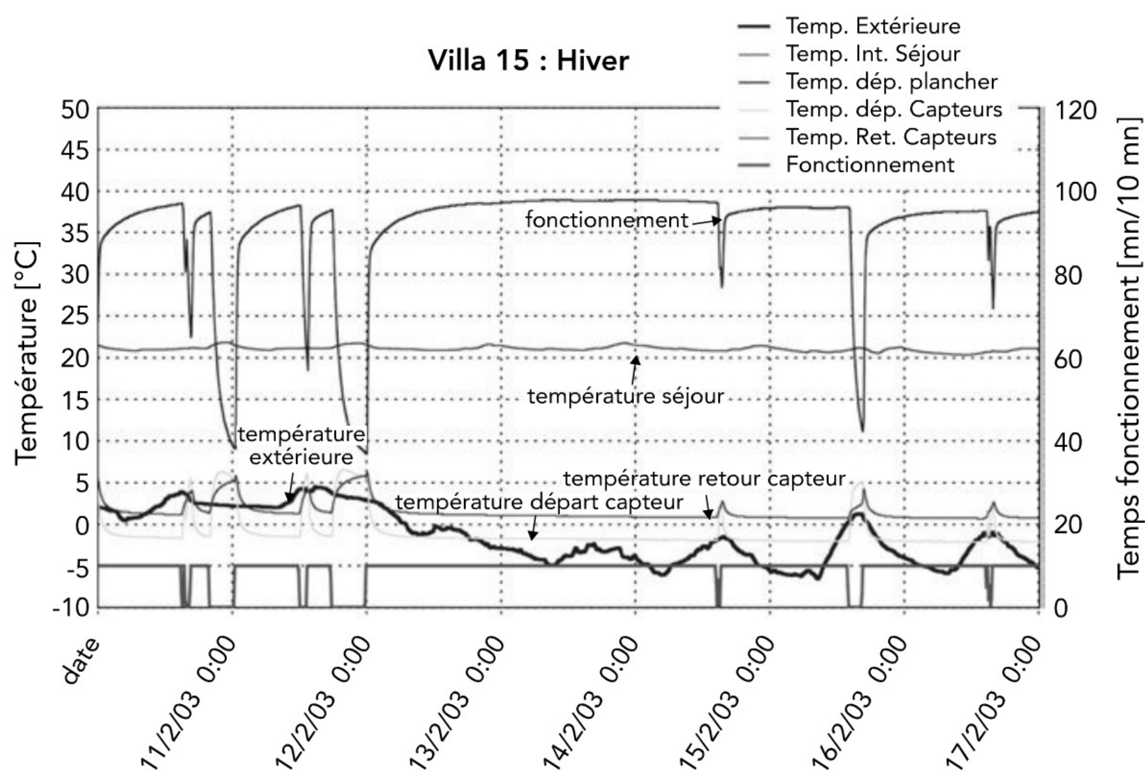


Figure 11.11 – Journée caractéristique (froide) d'hiver

Journée très chaude d'été

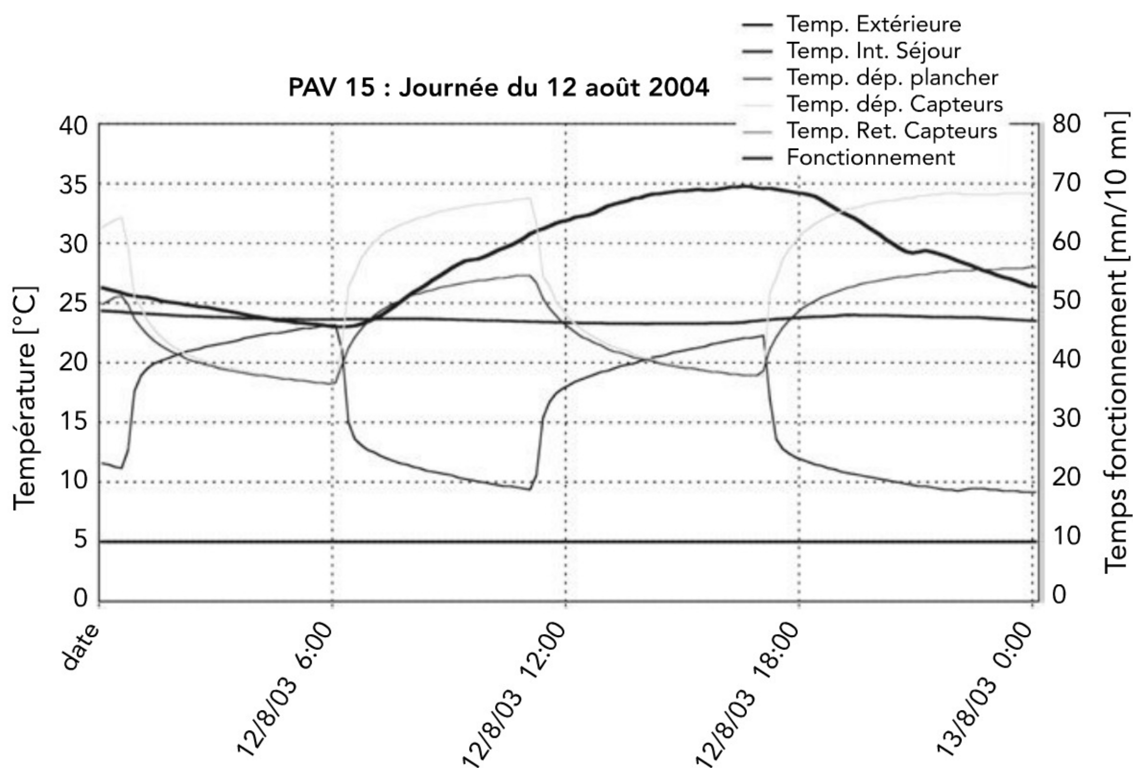


Figure 11.12 – Journée très chaude d'été
(période caniculaire du mois d'août 2003)

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

La température est maintenue entre 23 et 24 °C (pour 35 °C de température extérieure. Le système a fonctionné au-delà de qu'il était souhaité.

Bien que la température de départ dans les planchers soit inférieure à 15 °C, une grande partie du temps, aucune condensation de surface n'a été déclarée par les occupants.

11.4 Champs de sondes géothermiques

11.4.1 Domaines d'application

Les champs de sondes géothermiques constituent une solution permettant d'assurer le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments de taille intermédiaire.

Le nombre de sondes peut dépasser la centaine. À titre d'ordre de grandeur, 10 sondes de 100 m peuvent assurer les besoins de chauffage d'un immeuble de l'ordre de 15 à 20 logements.

Cette filière, qui commence à se développer en France, présente l'avantage de pouvoir être mise en œuvre en tous lieux. L'emprise au sol est réduite et contrairement au captage horizontal, les sondes peuvent être implantées sous une zone recouverte (parking par exemple). Cette filière est bien adaptée aux usages conjoints chauffage et climatisation, car cela permet un équilibre thermique du sous-sol. Le rafraîchissement par échange direct (*geocooling*) est également possible. Les coûts de maintenance du sous-sol sont particulièrement réduits (pas de pompes immergées, pas de corrosion…). Le poste « investissement forages » est par contre relativement élevé, d'où la nécessité déjà évoquée d'attacher une importance particulière au dimensionnement.

Les applications sont multiples. Outre les petits collectifs, certaines cibles comme les crèches, cliniques, salles de spectacles… sont bien adaptées à cette technologie. Des exemples intéressants fonctionnent depuis plusieurs années en Suisse, en Autriche, mais également aux USA où a été mis en service en 2004 un champ de 656 sondes de 137 mètres de profondeur (90 km forés). En France, 75 sondes de 160 m de profondeur viennent d'être réalisées sur le campus du plateau de Saclay (voir *chapitre 16*).

11.4.2 Mise en œuvre du champ de sondes

La profondeur des sondes est en général de l'ordre de 100 m (voire un peu moins en France, pour des raisons administratives, demande d'autorisation au-delà de 100 m). Ces procédés réglementaires sont actuellement en cours de révision.

Copyright © 2014 Dunod.

La tendance actuelle en Suisse est de réaliser des sondes plus profondes (200-500 m) que dans les années 1990 (50-200 m). Il existe en Suisse de nombreux forages profonds désaffectés, provenant notamment de l'exploration pétrolière mais aussi de la prospection des aquifères géothermiques. Deux sondes géothermiques vraiment profondes ont été conçues à partir de forages de prospection géothermique non productifs. La plus profonde atteint 2 300 m et se trouve à Weggis dans le canton de Lucerne, couplée à une pompe à chaleur, elle permet de chauffer quelques 50 logements et d'assurer la production d'eau chaude.

L'implantation des sondes les unes par rapport aux autres doit être réalisée dans le souci de limiter les interférences entre les sondes et d'assurer l'exploitation dans la durée sans baisse significative des performances.

L'écartement et la disposition des sondes sont fonction des conditions géologiques du sous-sol et du mode de prélèvement envisagé (chaud, froid).

Une distance de 7 à 10 m est généralement retenue.

Il faut insister sur l'avantage que représentent les applications associées aux PAC réversibles ou thermofrigopompes, notamment quand les besoins de prélèvement en mode chauffage sont proches de la quantité de chaleur injectée en mode rafraîchissement. Dans certaines configurations, il peut être envisagé de procéder à une recharge thermique par des panneaux solaires.

La disposition dépend de la surface mobilisable, il est clair qu'une disposition en ligne (*figure 11.13a*) ou en équerre (*figure 11.13b*) offrira moins d'interférences qu'une disposition groupée notamment en carré (*figure 11.13c*) ou rectangle à plusieurs rangées de capteurs.

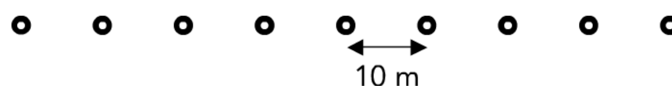


Figure 11.13a – Disposition des sondes en ligne

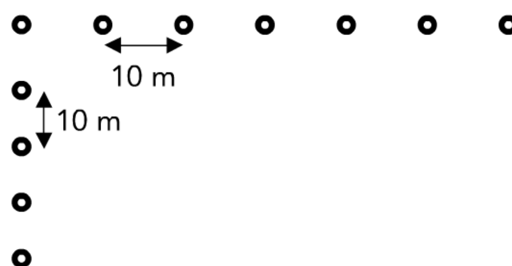


Figure 11.13b – Disposition des sondes en en équerre

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

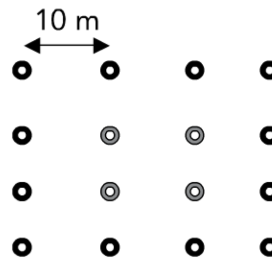


Figure 11.13c – Disposition des sondes en carré ou rectangle

Quand plus d'un forage est en cause, l'interaction thermique des forages peut avoir des conséquences sur l'efficacité à terme du système.

Dans le cas d'une disposition groupée illustrée par exemple par une disposition en carré comme dans la *figure 11.13c*, les forages situés en périphérie sont moins sujets aux interférences que les forages centraux, dans la mesure où ils peuvent échanger vers l'extérieur du champ, là où il n'y a pas d'autres forages.

Des formules mathématiques de comportement peuvent être introduites dans des modèles. On peut déterminer l'évolution de la température à une distance *r* de l'axe de la sonde en fonction du temps :

$$\Delta T = \frac{0{,}1833Q}{\lambda}\left[\log_{10}\frac{\alpha t}{r^2} + 0{,}106\frac{r^2}{\alpha t} + 0{,}351\right]$$

Tableau 11.3

Notations	Grandeurs	Unités
ΔT	Écart de température	°C
Q	Flux de chaleur par mètre de puits	W/m
λ	Conductivité thermique du sol	W/m/K
α	Diffusivité thermique $\left[\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}\right]$	m^2/h
r	Distance à l'axe du tube	m
t	Temps	h

Copyright © 2014 Dunod.

11.4.3 Dimensionnement

Lors du dimensionnement d'un champ de sondes et compte tenu du coût élevé des forages (de l'ordre de 70 à 100 € le mètre linéaire), une recherche d'optimisation économique s'impose.

Pour le chauffage seul, l'optimum économique se situe en dimensionnant le champ de sondes autour de 50 % de la puissance maximale appelée, sachant qu'environ 80 à 90 % des besoins seront assurés. Un appoint sera nécessaire pour assurer la pointe de la demande, sachant que dans ces conditions la PAC fonctionnera de manière plus continue et plus proche de sa puissance nominale.

Exemple : Cas d'une maison de retraite (région parisienne)

- surface : 1 500 m² ;
- puissance chaud : 90 kW ;
- puissance froid : 5 kW (parties communes) ;
- ECS solaire ;
- consommation annuelle : 160 MWh.

Deux hypothèses :

(1) puissance assurée à 100 % (13 sondes de 100 m) ;

(2) puissance assurée à 50 % (besoins assurés à 80 %) 6 sondes.

Tableau 11.4 – Bilan énergétique et environnemental

	CAS 1	Cas 2	Référence
Taux de couverture géothermique	100 %	80 %	gaz
Nombre de sondes	13	6	
Puissance PAC (kWth)	90	45	
COP de la PAC	3,5	3,5	
Énergie primaire tep/an	11,3	12,2	16,4
Quantité de CO_2 émises (tonnes/an)	9,1	15,1	38,6

La solution de référence est constituée d'une chaudière gaz et d'un climatiseur pour les parties communes.

Tableau 11.5 – Bilan économique (valeurs 2008)

Solution Géothermie	13 sondes	6 sondes
Investissement € HT	131 000	61 500
Temps de retour brut (années)	28	12
Temps de retour net (années) *Subvention : 30 % surcoût*	19,7	8,5

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

Le projet prévoit la climatisation de 120 m² sur 1 500 m².

Le rafraîchissement de l'ensemble serait possible par *free cooling* sans dépenses énergétiques importantes.

Remarques

Le dimensionnement sur sondes est totalement adaptable au projet. La contrainte liée à l'espace disponible pour la multiplication des sondes devient une contrainte majeure dans le collectif/tertiaire.

Certains contextes géologiques sont peu favorables au développement de SGV, comme les terrains présentant des cavités naturelles comme les karsts, ou des cavités anthropiques. En effet, dans ces types de terrains, la mise en œuvre de la cimentation du forage présentera d'importantes difficultés et il sera difficile d'obtenir un scellement des sondes efficaces et conformes à la norme.

De plus, des précautions particulières doivent être prises dans les zones où l'on rencontre des roches meubles instables (roches volcano-sédimentaires, pouzzolanes) ainsi que des roches présentant des risques de dissolution (évaporites) ou de retrait-gonflement (argiles). Les machines de forages doivent être adaptées à la nature des couches traversées.

La Norme **NF X10-970** homologuée en janvier 2011 définit les règles de l'art pour la mise en place de sondes géothermiques. Elle définit notamment :

- la distance entre les forages (10 m) ;
- les précautions contre l'artésianisme ;
- les contrôles et essais à réaliser au cours de travaux ;
- la nature du fluide caloporteur qui doit être biodégradable et de qualité alimentaire.

Copyright © 2014 Dunod.

12 Autres systèmes de captage par échange avec le sol

Parmi les alternatives aux solutions évoquées aux chapitres précédents pour les maisons individuelles, les corbeilles géothermiques présentent un intérêt par leur facilité et leur rapidité de mise en œuvre.

12.1 Corbeilles géothermiques

Les corbeilles offrent une alternative aux forages nécessités par les sondes. Constituées par des enroulements de tuyauteries, elles peuvent être descendues dans des excavations de quelques mètres de profondeur sans avoir en principe besoin d'une machine de forage.



Figure 12.1 – Maison individuelle équipée de corbeilles

Les corbeilles se distinguent par leur taille et leur forme, conique ou cylindrique. Les corbeilles de forme cylindrique (*figure 12.2*) ont une hauteur de 2 m pour un diamètre d'environ 0,5 m pour une puissance de l'ordre de 0,5 kW. Pour les corbeilles coniques (*figure 12.3*), il existe deux modèles : les petites ont une hauteur de 1,2 m pour un diamètre de 1,9 m au sommet et 0,9 m à la base. Elles atteignent une puissance comprise entre 0,7 et 1 kW. Les grandes corbeilles coniques, quant à elles, ont une hauteur de 2,6 m pour un diamètre au sommet de 2,1 m et de 1,1 m à la base et possèdent une puissance comprise entre 1,6 et 2 kW.

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

Chaque corbeille est constituée d'un tube de polyéthylène en boucle, d'une longueur d'environ 50 m. Ce tube est fixé sur une structure en forme de panier. Le fluide caloporteur (eau glycolée) circule dans les spirales de l'extérieur de la corbeille afin de capter le maximum de chaleur puis remonte par l'intérieur afin de ne pas se refroidir. Les corbeilles sont implantées à une profondeur comprise entre 1,5 et 4 m, permettant ainsi de s'affranchir des variations saisonnières de la température avec ses avantages et ses inconvénients. En effet, la partie inférieure ne bénéficiera pas de la recharge estivale.

Le nombre de corbeilles à installer dépend des caractéristiques du terrain ainsi que de la puissance de chauffage nécessaire. Pour une maison de 100 m², 4 à 6 corbeilles sont nécessaires si l'on veut assurer 100 % des besoins de chauffage. L'espacement minimum entre chaque corbeille est de l'ordre de 3-4 m.



Figure 12.2 – Corbeille cylindrique (Hekia)

Caractéristiques

- diamètre du tube DN25 × 2,3 ;
- longueur du tube : 100 m ;
- hauteur 2,3 m ;
- diamètre de la corbeille 1 m ;
- pas d'enroulement 8 cm.

Puissances extractibles (COP 4, 0/35° C)

- sol sec 0,7 kW par corbeille ;
- sol humide 1 kW ;
- sol saturé d'eau : 1,2 kW.

Copyright © 2014 Dunod.





Figure 12.3 – Corbeilles tronconiques (Betatherm)

Corbeille standard

- diamètre : en haut 1,9 m, en bas 0,9 m ;
- hauteur : 1,2 m ;
- longueur du tube : 100 m, PE 100 PN 16 ;
- dimension du tube extérieur : 32 mm ;
- contenu de l'eau saline : 53 litres ;
- poids sans l'eau saline : 20 kg ;
- puissance de privation : 0,7-1,0 kW* ;
- surface nécessaire : 10 m².

Corbeille grande

- diamètre : en haut 2,1 m, en bas 1,1 m ;
- hauteur : 2,7 m ;
- longueur du tube : 300 m, PE 100 PN 16 ;
- dimension du tube extérieur : 32 mm ;
- contenu de l'eau saline : 160 litres ;
- poids sans l'eau saline : 60 kg ;
- puissance de privation : 1,6-2,0 kW* ;
- surface nécessaire : 15 m².

Copyright © 2014 Dunod.

12.2 Échangeurs de type Slinky

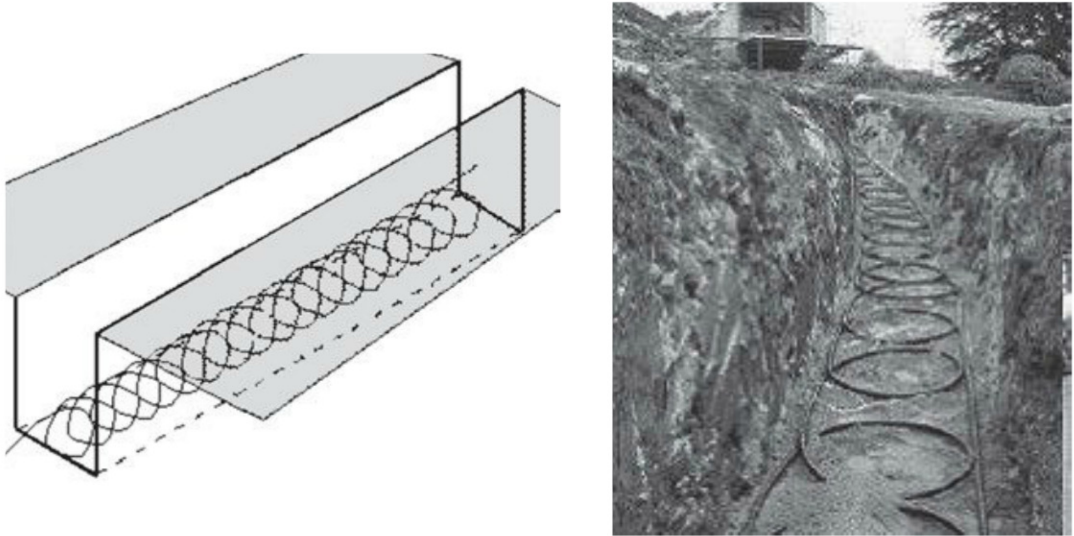


Figure 12.4 – Échangeurs Slinky

Il s'agit d'une variante du capteur horizontal, constitué d'un tuyau de polyéthylène fixé en spirale au fond d'une tranchée, puis recouvert de la terre de remblayage. Ces capteurs n'ont pas besoin de tranchées aussi longues que les autres échangeurs horizontaux pour capter la même quantité de chaleur.

L'espacement minimal entre les tranchées est de 3 m.

Copyright © 2014 Dunod.

13 Fondations géothermiques ou thermoactives

Le principe de ces fondations consiste à installer dans les fondations (dalles, parois, pieux) un réseau de tubes dans lequel on fait circuler un fluide caloporteur pour échanger l'énergie thermique avec le terrain. L'ensemble de ces tubes est relié à une pompe à chaleur susceptible de fournir le chauffage et le rafraîchissement.

13.1 Principe de fonctionnement

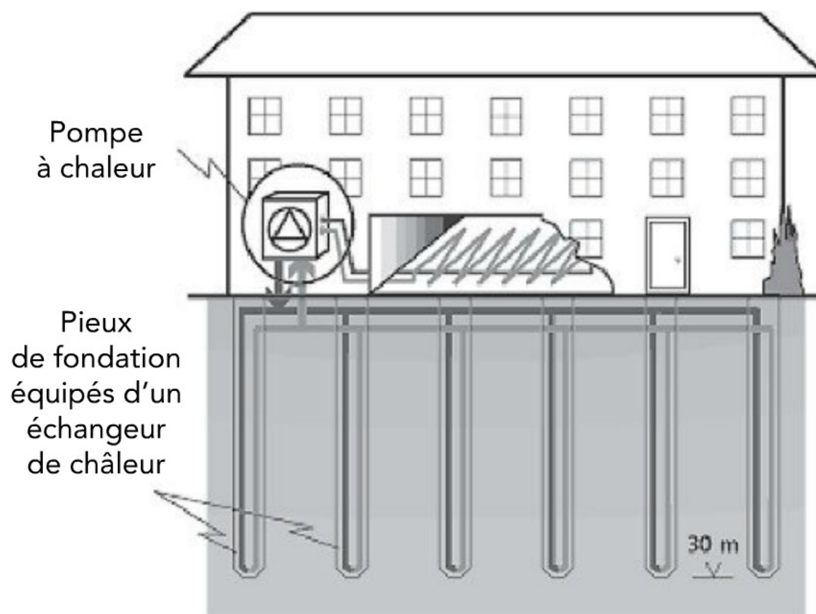


Figure 13.1 – Principe fondations géothermiques

Les paramètres déterminants de l'échange sont :

- la résistance thermique des pieux échangeurs. Celle-ci dépend notamment du type de pieu utilisé, de son diamètre, du nombre et de l'arrangement spatial des tubes dans le pieu et de la conductivité thermique des matériaux utilisés ;

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

- les caractéristiques du terrain où seront exécutées les fondations géothermiques, en particulier la conductivité thermique du terrain et la vitesse de Darcy si les fondations traversent une nappe aquifère, ce qui est généralement le cas pour les bâtiments équipés de ce système, nécessitant par ailleurs des fondations profondes.

Les valeurs de conductivité sont très nettement plus élevées en présence d'eau dans le terrain. La capacité de stocker de l'énergie thermique à long terme d'un ensemble de fondations géothermiques est généralement possible pour des vitesses de Darcy faibles (*ordre de grandeur de < 0,1 m/j*). Cependant, il faut s'assurer dans ce cas de l'équilibre thermique de ce stockage à long terme (*recharge active*). Les systèmes qui combinent le chauffage et le rafraîchissement assurent la recharge thermique. Dans ce cas-ci, le volume de sol occupé par les pieux (*figure 13.2*) agit comme un stockage saisonnier de chaleur.

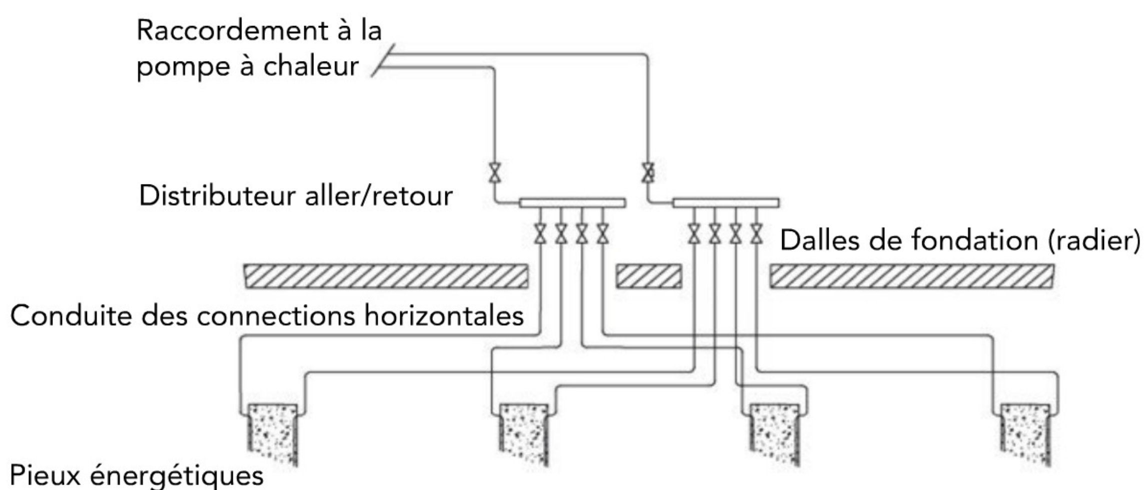


Figure 13.2 – Schéma de raccordement des pieux à la PAC

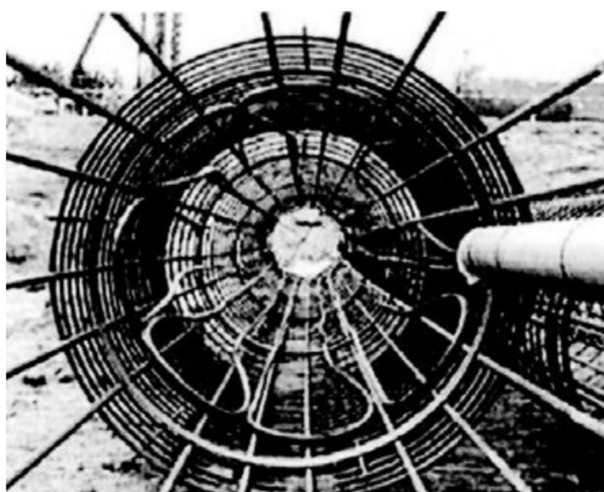


Figure 13.3a – Cage d'armatures métallique pour parois moulées munie de tubes PEHD (source : Stent – Balfour Beatty)

Copyright © 2014 Dunod.

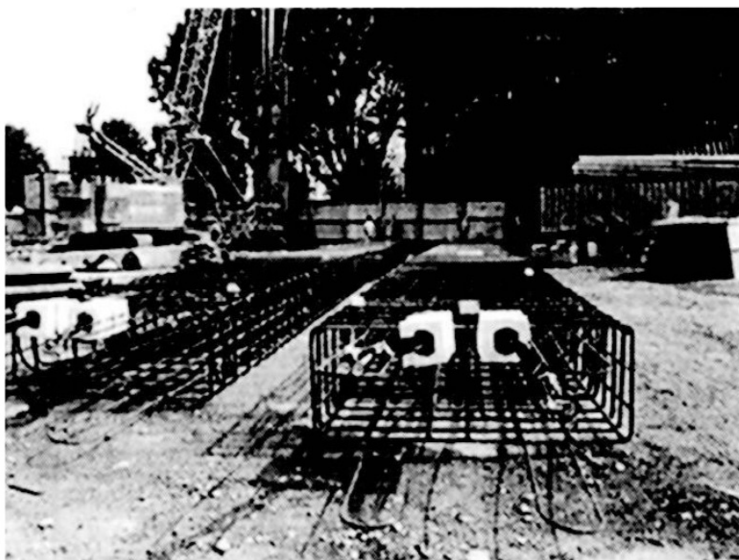


Figure 13.3b – Cage d'armatures métallique munie de tubes (source : www.zent-frenger.de)

On recense aujourd'hui en Europe plusieurs centaines de réalisations mettant en œuvre des fondations thermoactives. En France, quelques projets ont été initiés récemment (voir *chapitre 16.5*).

13.2 Recommandations simplifiées (pour avant-projet)

Ces recommandations ont été établies dans le cadre d'une étude (*Documentation SIA D0190*) financée par l'OFEN (*Office fédéral de l'énergie en Suisse*).

1. Pour des raisons de statique et de vieillissement prématuré des pieux, la température du fluide circulant dans les pieux ne devrait jamais être inférieure à zéro degré.

2. Une recharge thermique du terrain est indispensable si l'eau souterraine ne s'écoule pas.

3. Une recharge thermique du terrain devrait être combinée avec une production de froid en été.

4. Sans écoulement de l'eau souterraine, une recharge thermique doit atteindre environ 80 % de l'énergie annuelle extraite sur les pieux.

5. Une recharge thermique du terrain n'est pas nécessaire si un écoulement important de l'eau souterraine est présent (de l'ordre de 1 m/jour).

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

6. 1 m de pieu échangeur permet de chauffer environ 2 m^2 de surface de plancher.

7. Pour des besoins de chauffage et sans écoulement de l'eau souterraine, entre 25 et 40 W par mètre linéaire de pieu échangeur, peuvent être extraits du terrain. L'énergie annuelle extraite est comprise entre 60 et 80 kWh/m/an. Pour des besoins de refroidissement en utilisation directe (*sans machine frigorifique*), on peut envisager une puissance frigorifique maximum d'environ 30 W/m, et une énergie frigorifique comprise entre 50 et 60 kWh/m/an.

8. La présence d'un écoulement d'eau souterrain (> 1 m/jour) permet d'augmenter les valeurs ci-dessus d'environ 50 %.

9. La base du bâtiment devrait être isolée de manière à éviter les problèmes de condensation de l'humidité de l'air dans les caves ou les locaux en contact avec le terrain.

Copyright © 2014 Dunod.

14 Applications spécifiques

Le champ d'application des pompes à chaleur est particulièrement diversifié tant au niveau des techniques utilisées que de la taille et de la nature des besoins thermiques à satisfaire. Les solutions « chauffe-eau thermodynamique et systèmes combinés » devraient connaître un développement important sous l'effet des exigences de la nouvelle réglementation RT 2012.

14.1 Maisons individuelles

Toutes les sources de chaleur évoquées au chapitre 7 sont susceptibles d'assurer totalement ou partiellement les besoins énergétiques d'une maison individuelle par le biais d'une pompe à chaleur. La source la plus fréquemment utilisée est l'air extérieur qui a l'avantage d'être disponible partout. C'est également la solution thermodynamique nécessitant l'investissement le plus faible. L'inconvénient majeur des PAC extérieures est son manque de performance pour les températures les plus froides. Ce système est par contre bien adapté pour les climats type Sud de la France. Pour les régions plus froides, il peut être nécessaire d'associer à la PAC un système d'appoint, voire de substitution, pour les jours les plus froids. Deux schémas (*figure 14.1*) peuvent être envisagés :

Le **système bivalent alternatif** : la PAC assure seule les besoins énergétiques jusqu'à une certaine puissance appelée correspondant à la température de bivalence. Au-dessous de cette température, la chaudière installée ou déjà existante prend le relais. Il s'agit du système en relève de chaudière qui avait connu un certain essor dans les années 1980 suite aux chocs pétroliers. La chaudière peut être alimentée au gaz ou au fioul domestique.

Le **système bivalent parallèle** : la PAC est constamment sollicitée, elle assure la totalité des besoins jusqu'à la température de bivalence. Au-delà, un appoint est nécessaire. Cet appoint peut être une chaudière fioul ou gaz, voire une résistance

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

électrique. Un appoint électrique présentant cependant l'inconvénient d'être sollicité aux périodes de pointes, périodes durant lesquelles les centrales thermiques, au niveau national, doivent être mises en route.

Par souci de simplicité, l'ECS peut être assurée par le système d'appoint, soit toute l'année, soit l'été si la PAC est arrêtée. Il faut tenir compte du fait que le niveau de température requis pour l'ECS est constant et de l'ordre de 60 °C, ce qui constitue un handicap pour la performance de la PAC.

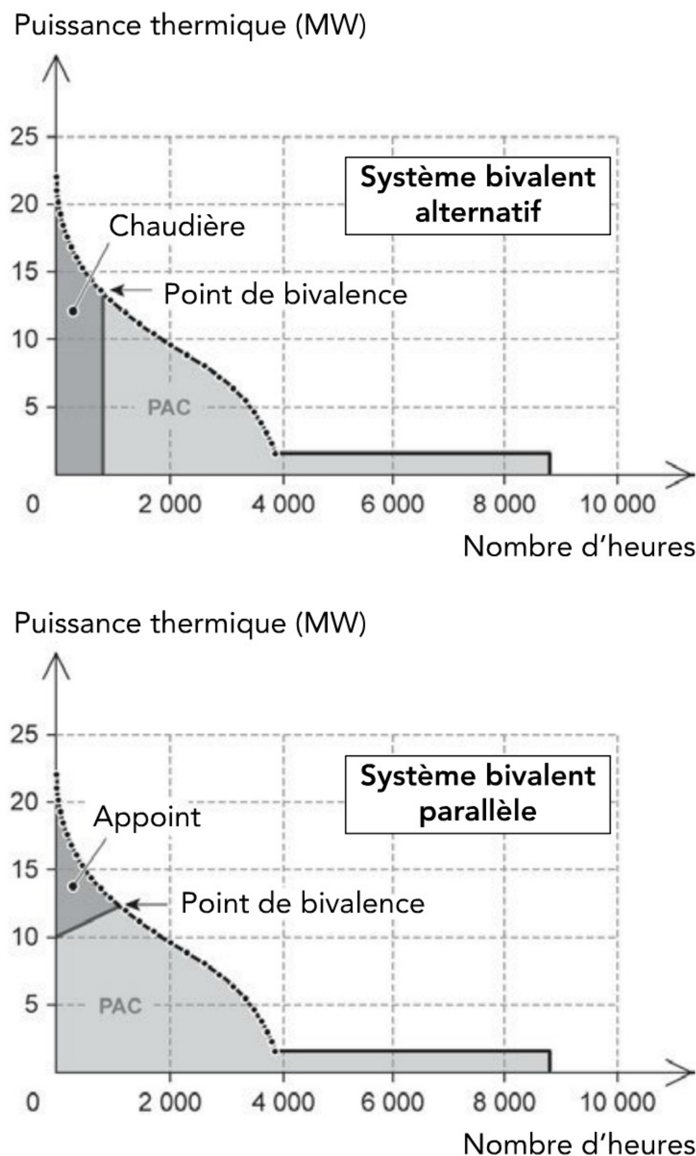


Figure 14.1 – Systèmes bivalents

L'air extrait est une ressource qui, pour des bâtiments bien isolés et étanches, peut apporter une contribution non négligeable au bilan énergétique chauffage associé à un double flux. En été, la récupération sur l'air extrait peut contribuer à la fourniture d'eau chaude sanitaire.

Copyright © 2014 Dunod.

14.2 Chauffe-eau thermodynamique

Le chauffe-eau thermodynamique (*figure 14.2*) n'est rien d'autre qu'un ballon d'eau chaude alimenté en énergie par le condenseur d'une pompe à chaleur noyé dans la cuve, comme la résistance électrique dans un ballon électrique. Comparé justement à un chauffe-eau électrique, il permet d'assurer les mêmes besoins avec une consommation trois fois moindre. Il constitue une façon simple de satisfaire l'obligation prévue dans la RT 2012 de recourir à au moins 50 kWep/m^2 d'énergie renouvelable en maison individuelle. La source de chaleur est soit l'air ambiant d'un local non chauffé, soit l'air extérieur, soit l'air extrait des logements et plus rarement un capteur enterré.

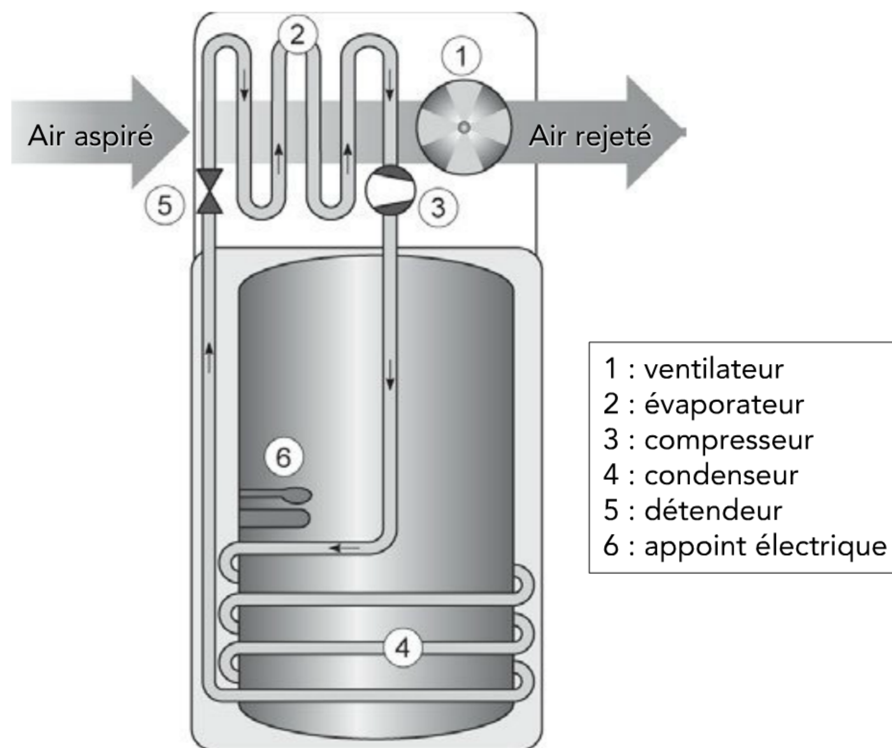


Figure 14.2 – Chauffe-eau thermodynamique monobloc (source Atlantic)

Le fonctionnement est simple : l'air ambiant aspiré par le ventilateur (1) est dirigé vers l'évaporateur (2) de la pompe à chaleur qui, dans un système monobloc, est situé au-dessus de la cuve. Le condenseur (4), noyé dans le réservoir, cède ses calories à l'eau du ballon. Un appoint électrique (6), généralement nécessaire pour atteindre une température supérieure à 55 °C, se déclenche uniquement en cas de besoin.

L'essentiel des chauffe-eau thermodynamiques proposés sont dits monoblocs lorsque la PAC est intégrée au-dessus de la cuve. Il existe également des

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

chauffe-eau biblocs, dits « splits », où le prélèvement de calories se fait dans une pièce extérieure.

La performance du chauffe-eau thermodynamique va évidemment dépendre de la température de l'air prélevé. Son implantation privilégiée se situe donc dans une pièce où la température reste modérée en hiver (cellier, garage, buanderie…).

La norme EN 255-3 fixe les conditions de mesures du COP dit instantané. Celui-ci, dans le cas d'un chauffe-eau thermodynamique, est établi pour un chauffage de l'eau chaude sanitaire de 15 °C à 45 °C et :

- pour une température de l'air de 15 °C (air ambiant) ;
- pour une température de l'air de 7 °C (air extérieur) ;
- pour une température de l'air de 20 °C (air extrait).

Les COP mentionnés par les principaux constructeurs varient de 3 à 4 (pour une température de prélèvement de 15 °C).

Les meilleurs coefficients de performance sont obtenus avec des équipements utilisant le CO_2 (R744) comme fluide frigorigène. Ce type d'appareils apparu récemment en France se distingue par sa rapidité de chauffe et par le fait qu'il ne nécessite aucun appoint électrique, même par –15 °C.

Il ne faut pas perdre de vue que dans le cadre de la nouvelle réglementation (RT 2012) ou BBC actuel, le poste ECS devient le poste principal de consommation d'énergie et que l'installation d'un chauffe-eau solaire ou chauffe-eau thermodynamique devient incontournable.

Copyright © 2014 Dunod.

14.3 Systèmes combinés

Il existe depuis peu de temps des systèmes combinés qui assurent les 4 fonctions :

- chauffage thermodynamique ;
- ventilation double flux ;
- rafraîchissement gratuit ou thermodynamique ;
- production d'eau chaude sanitaire (ECS).

Ce système à haute performance énergétique est bien adapté pour répondre aux exigences BBC RT 2005 et à la future réglementation thermique RT 2012.

La centrale est équipée :

- d'une VMC double flux avec récupération passive ;
- d'une pompe à chaleur (PAC) sur l'air extrait ;
- d'un chauffe-eau thermodynamique.



Figure 14.3a – Fonctionnement hiver : chauffage du logement (source : Hora ; www.hora.fr)

L'air extrait du logement cède l'énergie qu'il contient à l'air neuf, à travers les échangeurs statique et thermodynamique fonctionnant en série.

Copyright © 2014 Dunod.

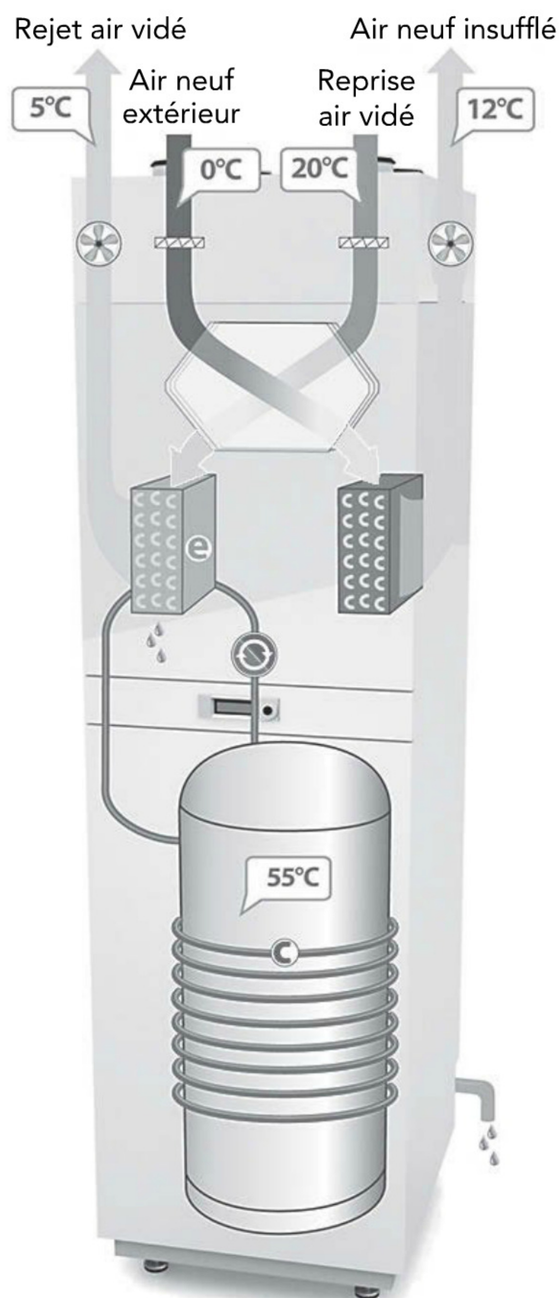


Figure 14.3b – Fonctionnement hiver : production d'ECS (source : Hora ; www.hora.fr)

Copyright © 2014 Dunod.

Lorsque la température du logement est satisfaisante, l'énergie contenue dans l'air extrait permet de réchauffer l'ECS *via* l'échangeur thermodynamique « ECS » tandis que l'air neuf se préchauffe à travers l'échangeur statique.



Figure 14.4a – Mi-saison : rafraîchissement par *free cooling* (source : Hora ; www.hora.fr)

Copyright © 2014 Dunod.

L'air neuf plus frais que l'air intérieur (lui-même supérieur à la température de consigne) est insufflé dans le logement. L'échangeur statique est by-passé et le compresseur arrêté.



Figure 14.4b – Fonctionnement été : rafraîchissement logement (source : Hora ; www.hora.fr)

La température souhaitée de l'ECS est atteinte. L'air neuf refroidi est dirigé vers un plafond rafraîchissant.

Copyright © 2014 Dunod.



Figure 14.4c – Fonctionnement été : production d'ECS et rafrâchissement « gratuit » du logement (source : Hora ; www.hora.fr)

Copyright © 2014 Dunod.

Les calories sont récupérées sur l'air neuf et non sur l'air extrait. L'air neuf cède ses calories *via* l'échangeur thermodynamique « ECS ». L'air neuf ainsi refroidi permet de refroidir le logement gratuitement.

14.4 Lotissement de pavillons individuels

Compte tenu des coûts de forage, il est difficilement envisageable de réaliser un forage (voire un doublet) pour un seul pavillon individuel.

Le concept d'une boucle d'eau froide pour alimenter plusieurs pavillons d'un même lotissement peut être envisagé à partir de l'eau extraite d'un forage et distribuée par un réseau spécifique sur lequel chaque pavillon équipé d'une PAC individuelle peut se brancher. La PAC (*figure 14.5*) assure les besoins de chauffage l'hiver et éventuellement, les besoins de rafraîchissement l'été si ceux-ci sont équipés de planchers chauffants-rafraîchissants.

Le *geocooling* peut également être envisagé. L'ordre de grandeur du débit maxi nécessaire au chauffage d'un pavillon (5 kW) est de l'ordre de 0,5 m^3/h.

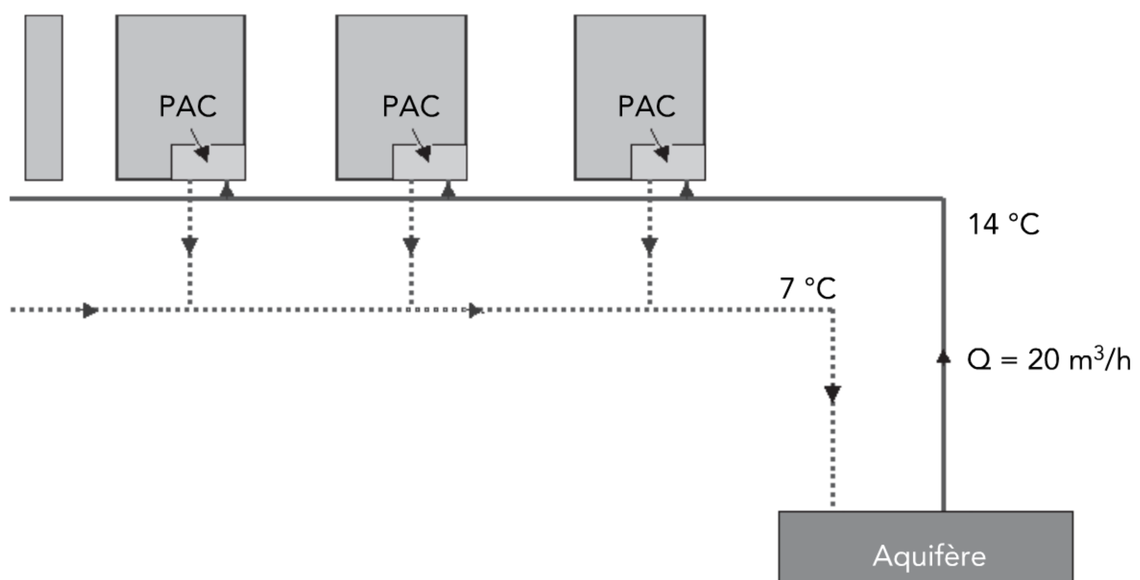


Figure 14.5 – Schéma d'implantation de PAC pour lotissement

14.5 Immeubles collectifs (chauffage)

Les solutions de chauffage thermodynamique pour les immeubles collectifs sont certainement promises à un développement important dans les années à venir. Pour l'habitat collectif, les solutions mettant en œuvre des PAC géothermiques semblent les mieux adaptées pour contribuer de manière significative aux objectifs fixés dans le cadre du Grenelle de l'environnement.

Copyright © 2014 Dunod.

Les PAC sur aquifère, sur champs de sondes ou fondations géothermiques, présentent l'avantage de pouvoir fournir le cas échéant du rafraîchissement dans des conditions énergétiques et économiques acceptables.

Pour ce type d'application, les émetteurs les mieux adaptés sont les planchers chauffants ou les plafonds rafraîchissants.

14.5.1 Exemple de dimensionnement

- Immeuble de 100 logements 7 niveaux, surface au sol 1 500 m².
- Surface à chauffer : 7 000 m², hauteur : 2,5 m ; G = 0,4 W / m3 / °C.
- Température non-chauffage = 17 °C.
- Température extérieure minimale : Tem = –7 °C.
- Rendement de distribution : 0,9.
- COP PAC : 3,5.
- Puissance minimale nécessaire pour satisfaire la totalité des besoins « chaud » : 210 kW.
- Quantité de chaleur utile nécessaire : 336 000 kWh.
- Solutions étudiées : aquifère superficiel – champ de sondes.

Solution aquifère superficiel

Détermination du débit nécessaire pour assurer 100 % des besoins de chauffage :

$$Q = P \times (1 - 1 / COP) / (1{,}16 \times \Delta T) / rdt = 24 \text{ m}^3/\text{h}$$

Il faut ensuite vérifier si au droit du site un aquifère existe et est capable de fournir le débit nécessaire. Une première approche peut être réalisée en consultant le site www.geothermie-perspectives.fr du BRGM. Il faudra également vérifier qu'il est possible d'implanter deux forages à une distance suffisante pour limiter le recyclage (100 à 150 m). L'intérêt de la solution devra ensuite être validé par une analyse économique sachant que l'élément déterminant est le coût des forages en fonction de la profondeur (2 000 €/ml). Il peut être intéressant de prendre en compte le fait qu'avec une PAC réversible un rafraîchissement des logements est toujours possible et quasi gratuit si *geocooling*.

Solution champ de sondes

Pour assurer les besoins énergétiques d'un bâtiment, il est possible d'adapter le nombre de sondes nécessaires sous réserve de disposer de l'espace nécessaire pour les implanter.

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

Le *tableau 14.1* détermine le nombre de sondes de 100 m nécessaires pour assurer les besoins, avec comme variables la capacité de prélèvement au mètre linéaire de sondes et l'espacement entre elles.

Tableau 14.1

	Cas étudiés	1	2	3	4
		Couverture 100 %		Couverture 85 %	
Hypothèses	Couverture des besoins %	100	100	85	85
	Prélèvement W/ml	50	40	50	40
	Espacement sondes (m)	6	10	6	10
	COP PAC	3,5	3,5	3,5	3,5
Résultats	Nombre de sondes	34	42	17	21
	Surface nécessaire m²	1 250	4 200	625	2 100

Pour des raisons économiques déjà démontrées au § 11.4.3, il est généralement plus intéressant de dimensionner le champ de sondes autour de 50 % de la puissance maximale, ce qui correspond entre 80 et 90 % de couverture des besoins. L'intérêt de cette configuration est qu'elle permet de diviser l'investissement sous-sol par 2 (entre 70 et 100 €/ml de sonde).

Pour l'exemple, traiter l'espace nécessaire pour implanter les sondes peut varier dans un rapport supérieur à 6. À noter que dans certaines conditions, il est possible d'implanter des sondes sous le bâtiment avant sa construction. La surface serait suffisante pour les cas favorables 1 et 3.

Comme pour la solution sur aquifère superficiel, le rafraîchissement est possible par réversibilité de la PAC ou par *geocooling*. L'intérêt supplémentaire non négligeable est constitué par la recharge thermique du sous-sol en période estivale.

14.6 Aménagement de ZAC – éco-quartiers

La construction d'un éco-quartiers a entre autres pour objectifs d'utiliser au maximum les énergies locales (*figure 14.10*). Parmi les sources d'énergie faisant appel aux énergies locales et susceptibles d'être valorisées par un système thermodynamique, on peut citer :

- les ressources aquifères superficielles ou à moyenne profondeur ;
- les champs de sondes ;
- les eaux usées ;

Copyright © 2014 Dunod.

- l'air extrait ;
- l'air extérieur.

Ces sources peuvent être combinées avec d'autres sources à usage direct, solaire (pour l'ECS), biomasse, réseau de chaleur UIOM.

Dans le cadre de la programmation d'un bâtiment, il existe des mesures règlementaires (règlementations thermiques) et incitatives (mesures fiscales, fonds chaleur) pour promouvoir l'utilisation d'énergies renouvelables. La nécessité pour les maîtres d'ouvrage de bâtiments de plus de 1 000 m^2 de réaliser « *une étude de faisabilité technique et économique des diverses solutions d'approvisionnement en énergie pour le chauffage, la ventilation, le refroidissement, la production d'eau chaude sanitaire et l'éclairage des locaux* » (décret n° 2007-363 du 19 mars 2007). De plus, certaines dispositions du Code de l'urbanisme issues du Grenelle de l'environnement prévoient que « *toute action ou opération d'aménagement telle que définie à l'article L. 300-1 et faisant l'objet d'une étude d'impact doit faire l'objet d'une étude de faisabilité sur le potentiel de développement en énergies renouvelables de la zone, en particulier sur l'opportunité de la création ou du raccordement à un réseau de chaleur ou de froid ayant recours aux énergies renouvelables et de récupération.* »

La mise en place de systèmes énergétiques performants, notamment celle d'énergies renouvelables, doit être intégrée très en amont du projet d'aménagement, afin d'identifier l'ensemble de ces contraintes. Une mutualisation des besoins devra être recherchée au niveau de la zone à aménager. Les solutions intégrant des systèmes thermodynamiques, notamment à partir de sources géothermiques basse température, sont susceptibles de répondre aux exigences citées ci-dessus. Des synergies sont possibles entre production de chaud et froid, par exemple : commerces et habitat, piscine et patinoires.

14.7 Systèmes de distribution de chaleur à partir de PAC sur aquifère peu profonds (réseaux de chaleur basse température)

La distribution de chaleur pour des ensembles importants, à partir d'une ressource d'un aquifère peu profond peut être réalisée selon plusieurs schémas.

14.7.1 Boucle d'eau froide

Ce schéma a déjà été évoqué au § 14.4 pour des pavillons individuels. Le même système peut être mis en œuvre pour desservir des immeubles en zone urbaine dense.

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

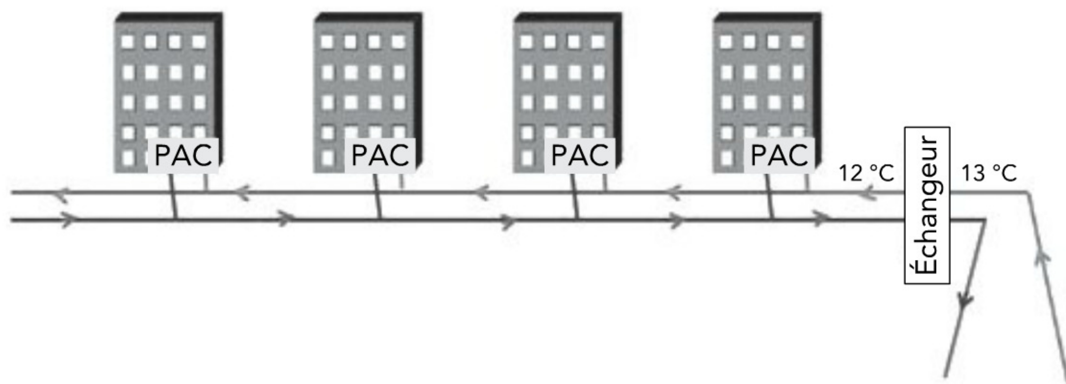


Figure 14.6 – Boucle d'eau froide

Une boucle d'eau froide (12 °C) circule dans la zone à desservir. Chaque bâtiment est équipé d'une PAC qui prélève sur la boucle le débit nécessaire à ses besoins. Ces besoins peuvent être de chauffage seul ou de chauffage et d'eau chaude sanitaire. Dans ce deuxième cas, il peut être judicieux de prévoir dans chaque sous-station deux PAC, une dédiée au chauffage, l'autre à l'ECS. Si le climat le justifie, le rafraîchissement peut être envisagé, soit par réversibilité de la PAC chauffage, soit par free-cooling à partir de l'eau de la boucle, ou encore par récupération du froid sur la PAC ECS.

14.7.2 Systèmes centralisés

La pompe à chaleur est directement implantée à la sortie du forage afin d'élever le niveau de température de l'eau distribuée dans le réseau de façon compatible avec les besoins. Deux configurations peuvent être envisagées si les besoins sont à la fois chauffage et ECS :

- **Configuration deux tubes :** la température de départ sortie PAC doit permettre de produire de l'eau chaude sanitaire à la température de 55-60 °C quels que soient les besoins de chauffage. Il n'y a qu'un seul et même départ pour le chauffage et l'ECS. Le retour est commun.

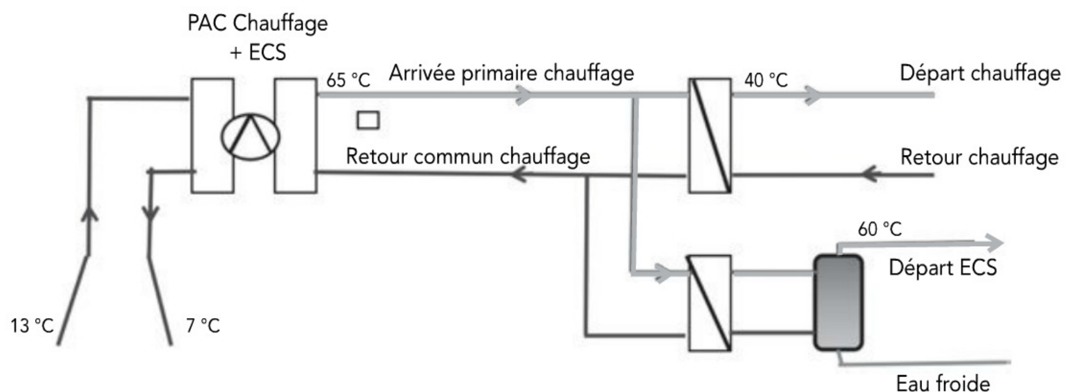


Figure 14.7 – Système centralisé (2 tubes)

Copyright © 2014 Dunod.

- **Configuration trois tubes :** la production thermique centralisée se fait à partir de deux PAC différentes, l'une pour le chauffage basse température, l'autre pour l'ECS à un niveau plus élevé. Il y a donc un départ chauffage, un départ ECS et un retour commun, soit 3 tubes. Cette disposition, plus coûteuse, permet un rendement meilleur pendant la période de chauffage.

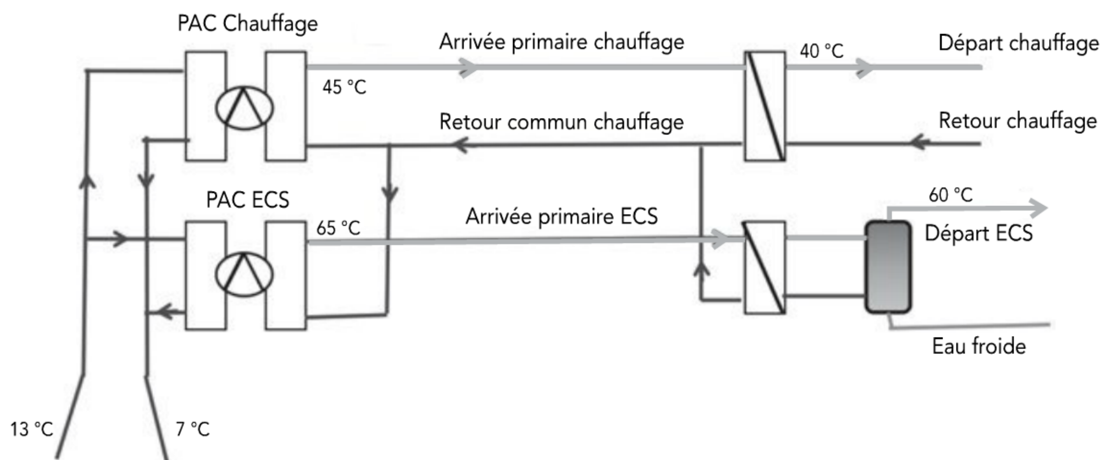


Figure 14.8 – Système centralisé (3 tubes)

14.7.3 Boucle d'eau tiède (cas du Fort d'Issy)

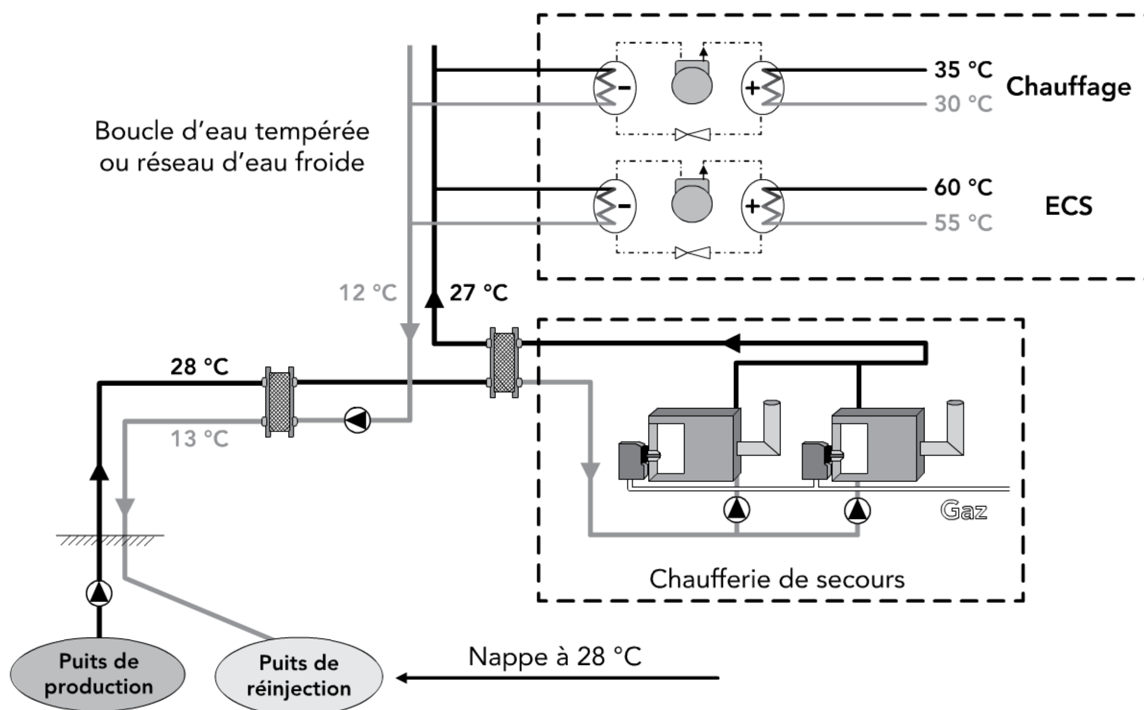


Figure 14.9 – Schéma de principe de la boucle d'eau tempérée (source : Dalkia)

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

Dans certaines régions et notamment en Île-de-France, il existe des aquifères dits intermédiaires (500-600 m) susceptibles de fournir de l'eau dans une plage 25-30 °C avec des débits au delà de 150 m^3/h. Cette température est généralement insuffisante pour assurer les besoins de chauffage par échange direct et largement insuffisante pour l'ECS.

L'éco-quartier du Fort d'Issy-les-Moulineaux est ainsi chauffé à partir d'un aquifère (Albien) dont la température est de 28 °C avec un débit exploitable de 185 m^3/h. La couverture des besoins des 1 600 logements est assurée à 100 % par les PAC situées au pied de chaque immeuble. Le faible ΔT au niveau des PAC permet l'obtention d'un COP chauffage largement supérieur à 4. Une chaufferie gaz d'appoint est prévue en secours.

14.8 Exemple d'aménagement d'une ZAC (commune du département des Hauts-de-Seine)

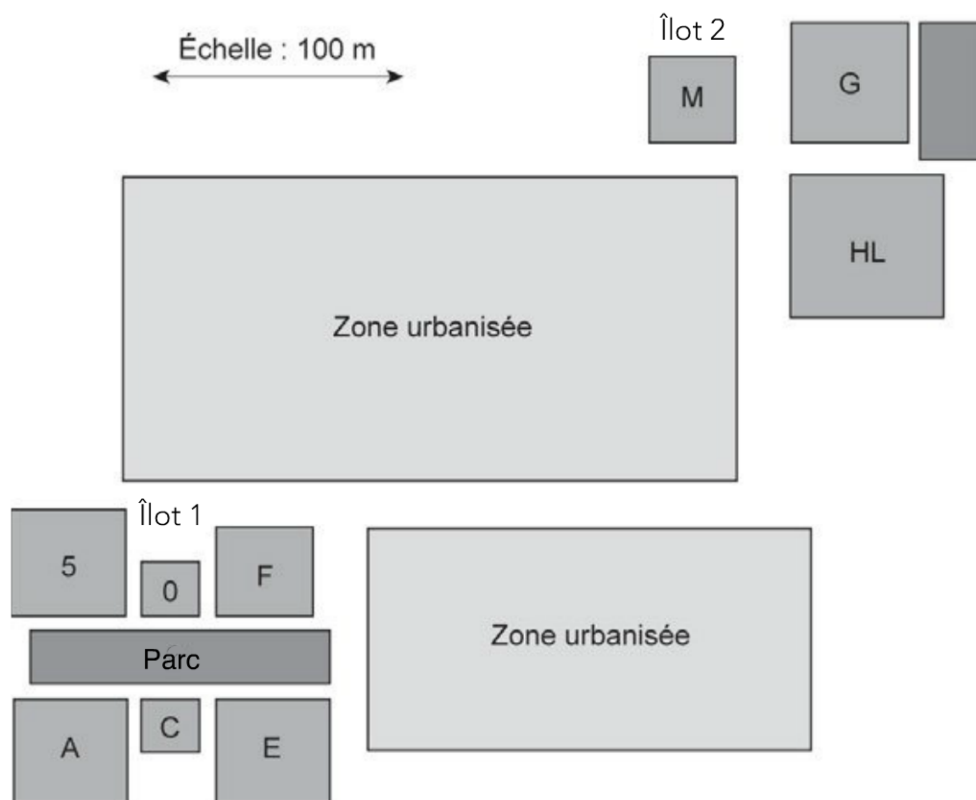


Figure 14.10 – Exemple d'aménagement d'une ZAC (extrait d'une opération d'aménagement dans le département des Hauts-de-Seine)

Copyright © 2014 Dunod.

Principales caractéristiques de la ZAC : 10 % des surfaces sont dédiées aux commerces et le reste à des habitations privées.

La puissance maximale nécessaire pour assurer les besoins de chauffage est évaluée à 2 030 kW (îlot 1 : 1 270 kW ; îlot 2 : 760 kW).

Tableau 14.2

	Lots	Surface habitable m²
ÎLOT 1	A	13 000
	B	11 100
	C	4 400
	D	2 500
	E	5 700
	F	5 400
	Sous-total	42 100
ÎLOT 2	G	12 000
	H-L	9 000
	M	4 260
	Sous-total	25 260
TOTAL		67 360

Le site a la chance de disposer en son sous-sol d'une ressource aquifère susceptible de produire entre 50 et 100 m^3/h à 13 °C.

Hypothèse retenue : 75 m^3/h.

Dans le cas de mise en place de sondes, la capacité de prélèvement retenue est de 50 W/ml.

À partir de ces données, on peut envisager plusieurs solutions.

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

À partir de l'aquifère superficiel :

- **Solution 1** : 2 doublets et un réseau de chaleur desservant les 2 îlots :
  - puissance PAC : 2 × 750 kW,
  - appoint gaz : 500 kW,
  - couverture des besoins par la PAC : 95 % ;
- **Solution 2** : décentralisée, 1 doublet par îlot :
  - îlot 1 : couverture des besoins : 90 %,
  - îlot 2 : couverture des besoins : 100 % ;
- **Solution 3** : boucle d'eau froide 13 °C sur chaque îlot, chaque bâtiment dispose d'une PAC branchée sur le réseau selon le principe de la *figure 14.6*.

À partir d'un champ de sondes :

- **Solution 4 :** champ de sondes par bâtiment (*tableau 14.3*) :
  - profondeur 100 m ;
  - prélèvement 50 W/100 m ;
  - espacement entre sondes 10 m.

L'option à 50 % de la puissance est à privilégier, d'autant que la surface d'implantation des sondes est réduite. Dans cette option, 144 sondes seront néanmoins nécessaires, nécessitant de réaliser des sondes sous le bâtiment avant sa construction.

Il peut être imaginé d'autres variantes aux 4 solutions présentées ci-dessus, notamment :

- sondes de 160 m voire 200 m, au lieu de 100 m (cette variante nécessite une dérogation à la réglementation actuelle) ;
- réseau alimenté à partir des sondes selon le même principe que la solution 3.

Les 4 solutions présentées ici ont un bilan carbone particulièrement favorable, à savoir une réduction de plus de 80 % par rapport à une solution gaz.

Copyright © 2014 Dunod.

Tableau 14.3 – Résultats de la solution n° 4, puissances 50 % et 100 %

	Lots	Surface habitable m²	Surface au sol bâtiment	Emprise foncière	Couverture 100 %		P 50 % couverture 85 %	
					Nombre de sondes	Surface nécessaire m²	Nombre de sondes	Surface nécessaire m²
ÎLOT 1	A	13 000	2 600	3 900	56	5 571	28	2 786
	B	11 100	2 220	3 330	48	4 757	24	2 379
	C	4 400	880	1 320	19	1 886	9	943
	D	2 500	500	750	11	1 071	5	536
	E	5 700	1 140	1 710	24	2 443	12	1 221
	F	5 400	1 080	1 620	23	2 314	12	1 157
	Sous-total	**42 100**	8 420	12 630	180	18 043	90	9 021
ÎLOT 2	G	12 000	2 400	3 600	51	5 143	26	2 571
	H-L	9 000	1 800	2 700	39	3 857	19	1 929
	M	4 260	852	1 278	18	1 826	9	913
	Sous-total	**25 260**	5 052	7 578	108	10 826	54	5 413
TOTAL		**67 360**	13 472	20 208	289	28 869	144	14 434

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

14.9 Immeubles tertiaires

Les immeubles du secteur tertiaire constituent une cible privilégiée des applications des pompes à chaleur dans la mesure où ils ont en général des besoins de chaud et de froid, soit alternativement, soit de manière simultanée. C'est le cas notamment des centres commerciaux, hôpitaux, cliniques (*figure 14.11*) et certains immeubles de bureaux…

Cas d'une clinique :

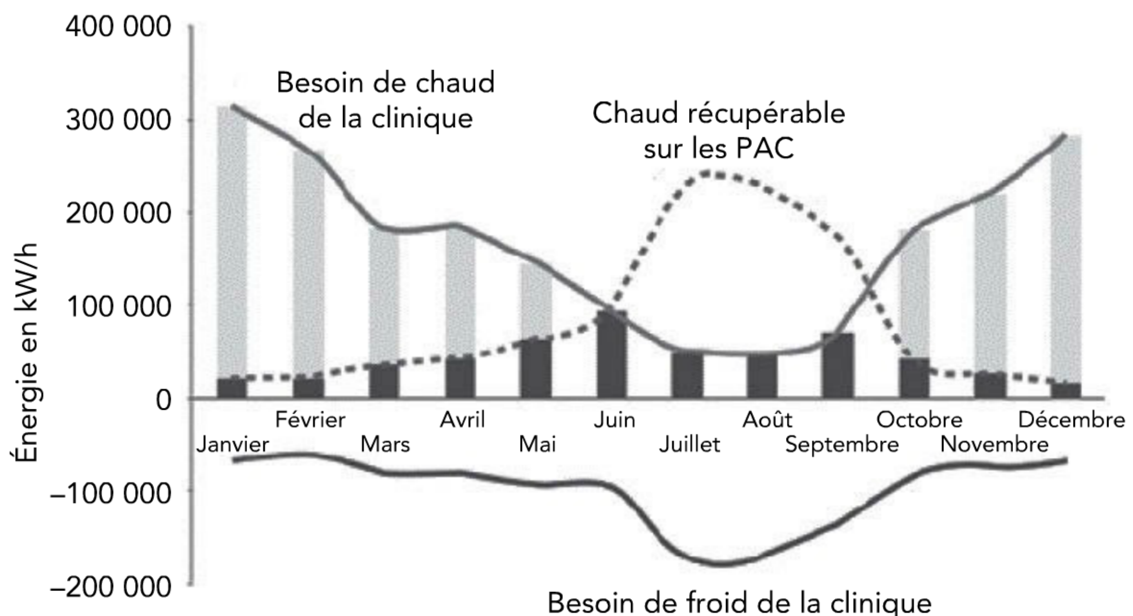


Figure 14.11 – Exemple de besoins de chaud et de froid d'une clinique

On note sur la *figure 14.11* la répartition des besoins de chaud et de froid au cours d'une année. Par exemple, avec l'utilisation d'une thermofrigopompe, l'ensemble des besoins de chaud (ECS) est produit gratuitement de juin à septembre compte tenu des besoins de froid de la clinique pendant cette période.

Cas d'un centre commercial :

Un centre commercial de 84 000 m^2 abrite 200 boutiques, un cinéma multiplex de 12 salles et des restaurants. Les besoins de chaud et de froid sont assurés par une boucle d'eau froide à température constante. Le maintien en température est assuré par échange par une boucle géothermale constituée de deux forages de production et 4 forages de réinjection. L'aquifère sollicité, situé entre 60 m et 100 m de profondeur, assure un débit de 280 m^3/h à une température de 14 °C. La boucle d'eau froide alimente les pompes à chaleur des différentes boutiques et restaurants. Le système mis en place assure 100 % des besoins de chaud et 75 % des besoins de rafraîchissement.

Copyright © 2014 Dunod.

14.10 Cultures sous serres

Le chauffage des serres (*figure 14.12*) constitue une cible privilégiée pour les systèmes énergétiques performants dans la mesure où la densité des besoins en énergie y est élevée, et que le niveau de température peut être bas. Sous nos latitudes, il faut en moyenne 200 tonnes de fioul par hectare et par an pour les cultures maraîchères et environ 400 tonnes pour les cultures florales. La croissance optimale des plantes est fonction de la température et varie selon le type de culture (14 °C pour la laitue, 20 °C pour la tomate, 28 °C pour le concombre).

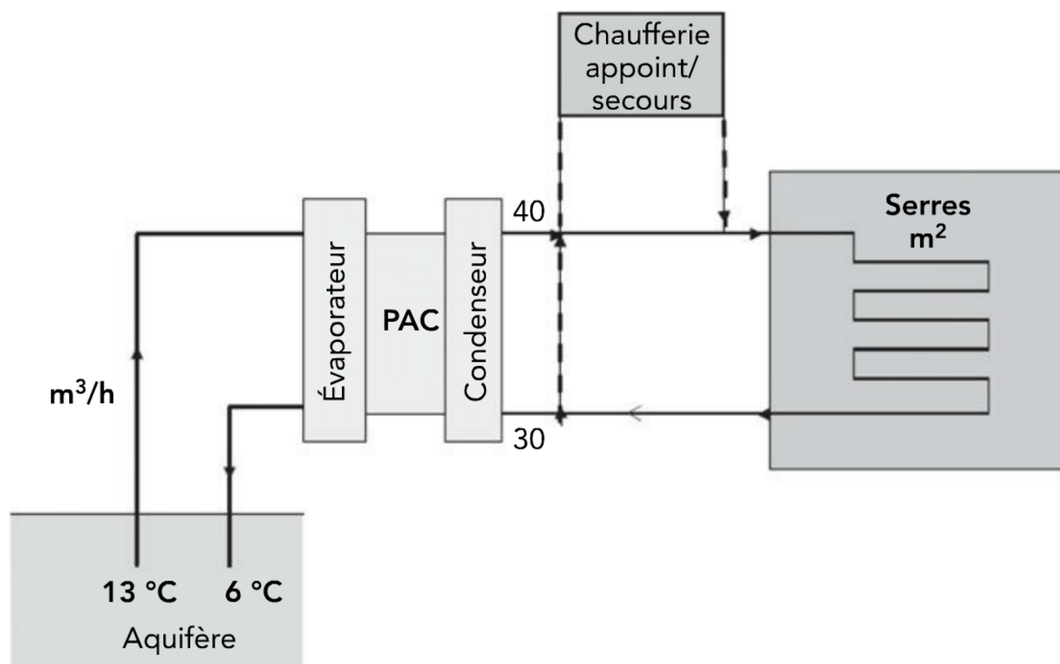


Figure 14.12 – Schéma d'une PAC pour le chauffage d'une serre

À partir d'une ressource de faible profondeur, on peut par l'intermédiaire d'une pompe à chaleur alimenter une serre horticole ou maraîchère.

De plus, l'utilisation d'un aquifère peu profond offre, en raison de sa faible minéralisation, la possibilité de prélever de l'eau pour arrosage (poste de dépense non négligeable).

La serre peut également constituer en été un capteur de chaleur et le sous-sol utilisé pour stocker cette chaleur estivale, et la restituer l'hiver.

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

Copyright © 2014 Dunod.

15 Pompes à chaleur associées à un réseau de chaleur géothermique

Il existe de nombreux systèmes pouvant associer un réseau de chaleur géothermique avec une pompe à chaleur. L'adjonction d'une pompe à chaleur permet d'abaisser la température de retour et ainsi d'augmenter la puissance disponible (*figure 15.1*).

Rappelons que la puissance délivrée par la géothermie par échange direct est donnée par la formule :

$$Pgéo\ kW = 1{,}16 \times Q\ (m^3/h) \times (Te - Ts)$$

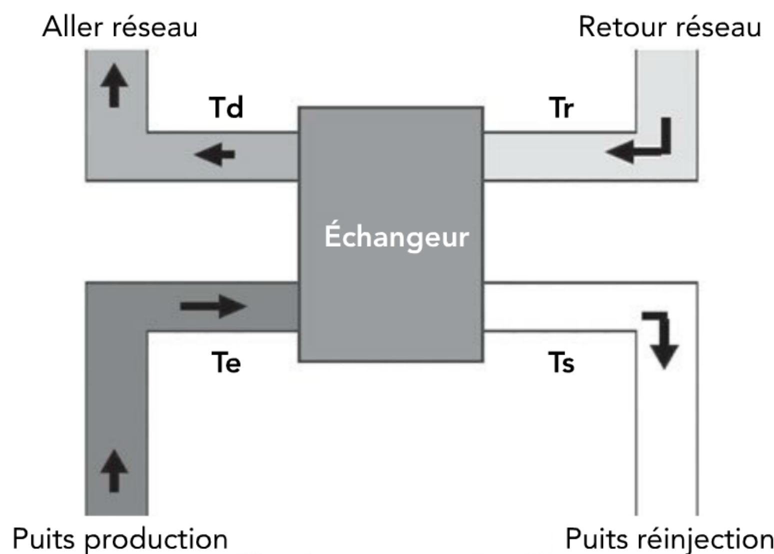


Figure 15.1– Principe d'échange géothermique

La puissance thermique, mobilisable par une ressource géothermique en échange direct, dépend essentiellement de deux paramètres : le débit exploité qui peut être artésien ou assisté par la mise en place de pompes, l'écart de température entre la température de la ressource et la température de rejet.

Le principe fondamental de conception et d'exploitation d'un réseau de chaleur « basse température » utilisant l'énergie géothermale consiste à obtenir,

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

pour chaque régime de fonctionnement, la température de retour la plus basse possible. La température de sortie de l'échangeur dépend de la ressource, celle de retour dépend des émetteurs de chauffage comme démontré au § 6.1.

Exemple :

Opération géothermique en échange direct en région parisienne :

$$Q = 200\ m^3/h\ ;\ Te = 75\ ;\ Ts = 40$$

$$P = 8\ 120\ kW$$

Il est clair qu'avec une température de rejet de 40 °C, le potentiel est loin d'être épuisé. L'adjonction d'une pompe à chaleur doit permettre d'épuiser davantage la ressource et ainsi de gagner en puissance récupérable. Pour y parvenir, plusieurs montages peuvent être envisagés.

15.1 Système avec PAC assistée par échangeur et évaporateur indirect

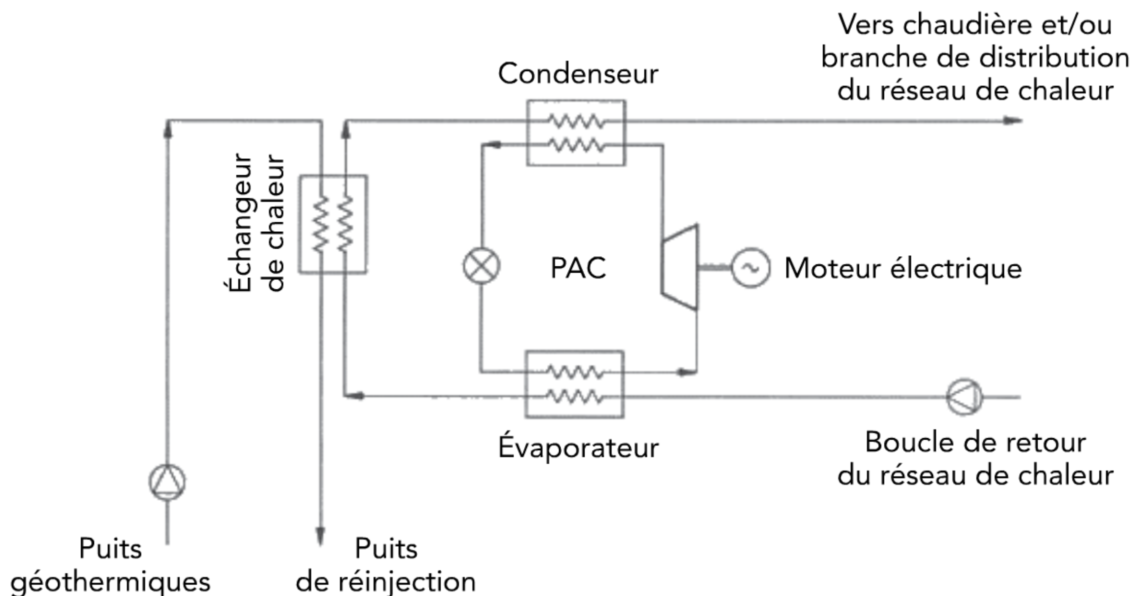


Figure 15.2

Dans la *figure 15.2*, l'évaporateur de la PAC est placé sur le retour du réseau géothermique, le condenseur est placé en série avec l'échangeur. Ce montage permet de relever le niveau de température avant utilisation. Pour améliorer la puissance apportée au réseau, il est nécessaire que la température de sortie du condenseur soit supérieure à celle de sortie de l'échangeur. Cela peut être au détriment du COP de la PAC.

Copyright © 2014 Dunod.

15.2 Système indirect avec possibilité de *by-pass* de la PAC et de l'échangeur géothermique

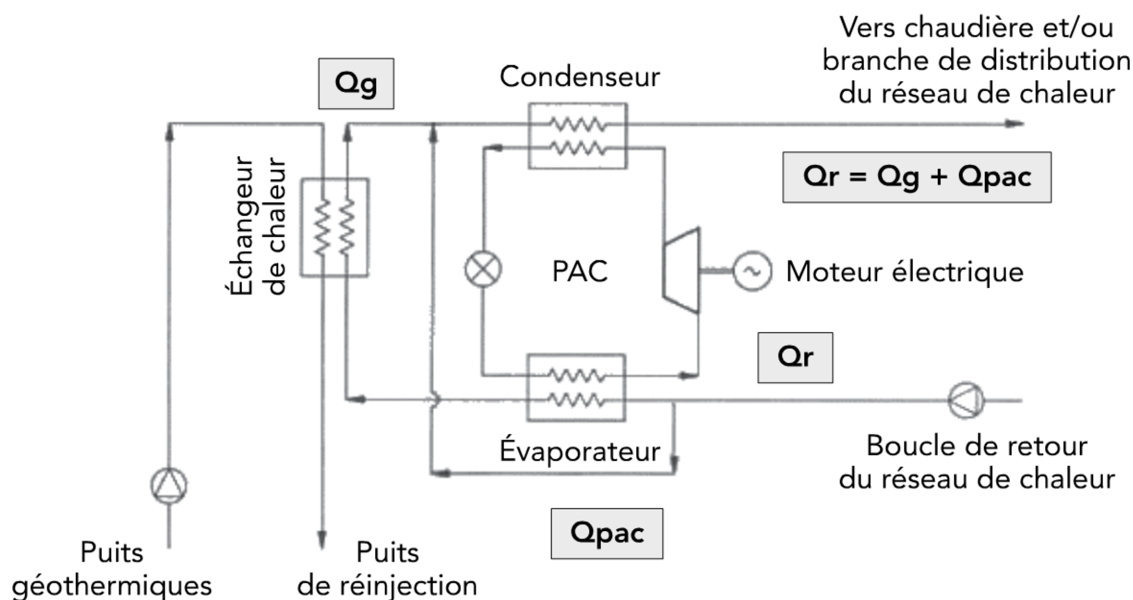


Figure 15.3

15.3 Système avec montage parallèle entre le condenseur de la PAC et la branche contenant l'évaporateur et l'échangeur géothermique

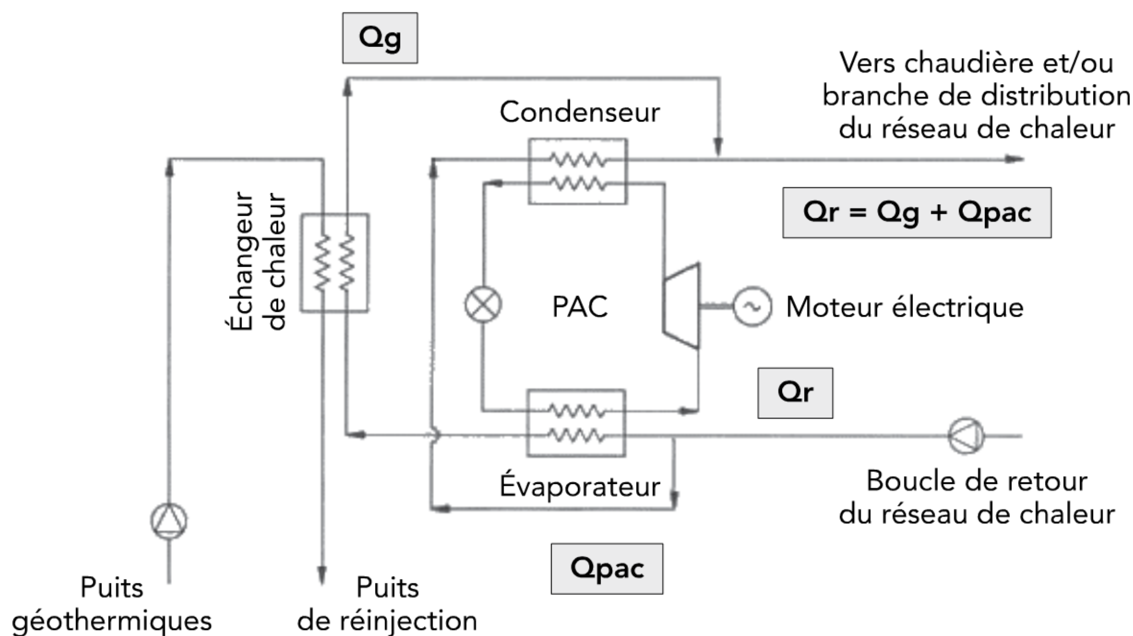


Figure 15.4

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

Le condenseur est placé en parallèle avec l'échangeur, il permet d'augmenter le débit du circuit géothermique vers les utilisateurs et donc la puissance distribuée dans le réseau. Ce système est plus performant que le précédent lorsque la température de la ressource dépasse 70 °C.

15.4 Montage des pompes à chaleur

Dans les systèmes précédemment présentés, une seule pompe à chaleur est indiquée. Cependant, il est possible d'inclure une ou plusieurs unités, disposées en série, en parallèle, ou en série-parallèle.

15.4.1 Montage en parallèle

Le montage en parallèle des évaporateurs et des condenseurs de plusieurs pompes à chaleur, comparé à la solution de base ne comportant qu'une seule PAC, présente les caractéristiques suivantes :

- le COP de l'ensemble des PAC en parallèle est identique à celui d'une seule PAC fournissant la même énergie thermique ;
- le prix d'investissement est supérieur, car le système est plus complexe ;
- pendant le fonctionnement du système, il est possible d'arrêter séparément une ou plusieurs PAC en correspondance avec la puissance appelée nécessaire.

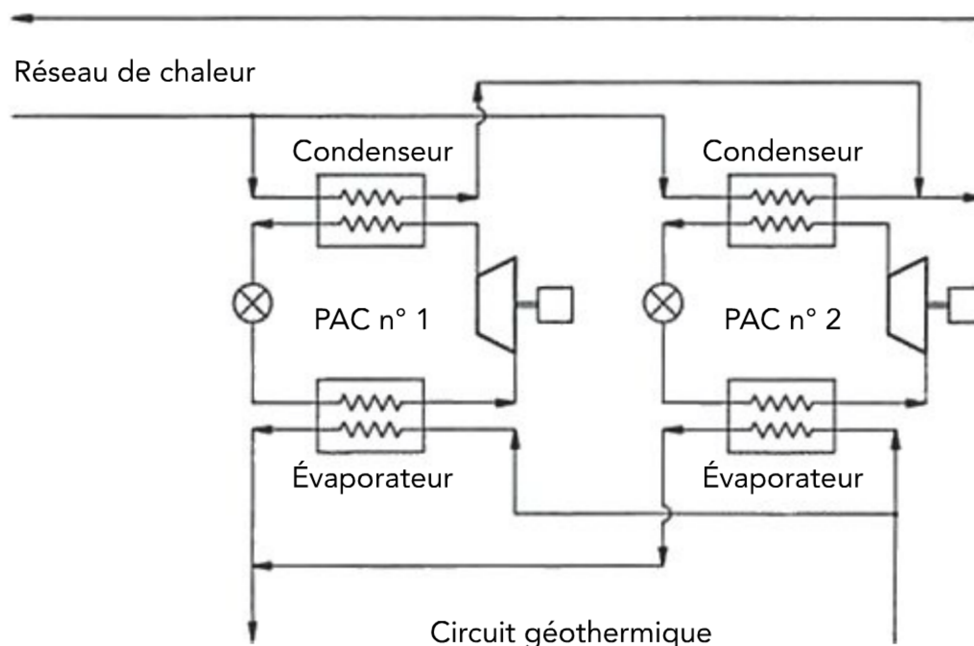


Figure 15.5 – Montage en parallèle

Copyright © 2014 Dunod.

15.4.2 Montage en série

La disposition de deux PAC en série et à contre-courant, avec évaporateurs et condenseurs connectés en série, et avec l'écoulement au travers du condenseur opposé à l'écoulement traversant l'évaporateur, dans un système à PAC uniquement, est présenté dans la *figure 15.6* :

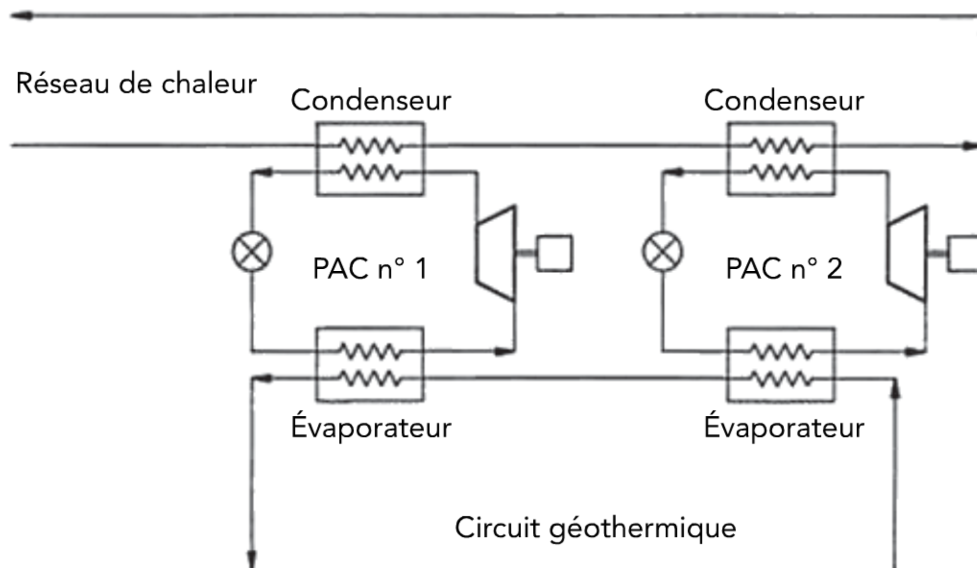


Figure 15.6 – Montage en série

Cette disposition permet de réduire l'écart de température pour chacune des unités. Ainsi, le COP moyen de l'ensemble des PAC en série est supérieur au COP d'une seule PAC fournissant la même énergie thermique. Malgré le lourd prix d'investissement dû à la complexité du système, le montage en série est souvent la solution la plus rentable.

15.4.3 Montage en série-parallèle

Il est possible de coupler les deux montages précédents. Le raccordement en série se fait à contre-courant. Ce montage permet de réduire l'écart de température entre l'évaporateur et le condenseur et donc d'améliorer la performance globale comme illustré par la *figure 15.7.*

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

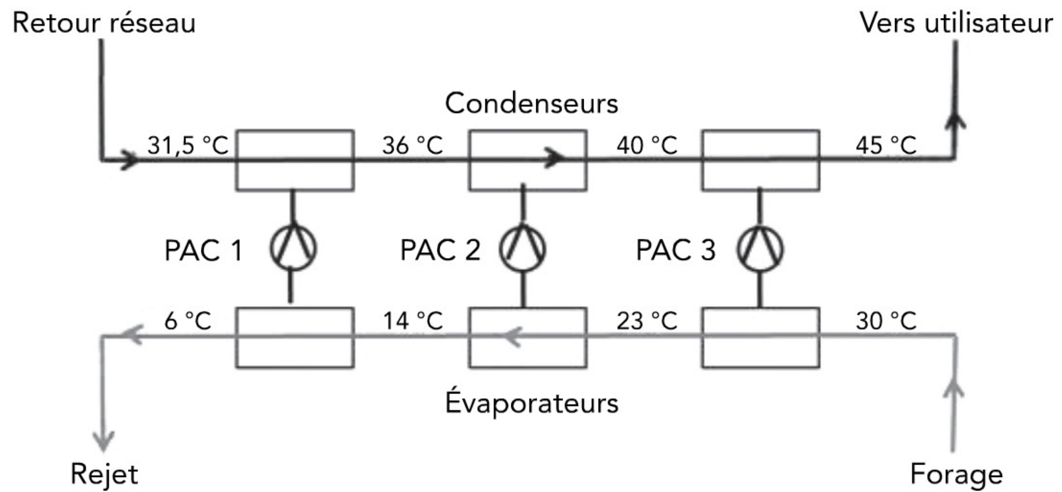


Figure 15.7 – Montage en série-parallèle

- COP PAC n° 1 = 5,7 ;
- COP PAC n° 2 = 6,4 ;
- COP PAC n° 3 = 6,1 ;
- COP global : 6,1.

Avec une seule PAC, le COP effectif ne serait que de 4,8.

Copyright © 2014 Dunod.

16 Exemples de réalisation

Ce chapitre présente quelques opérations exemplaires récentes utilisant les différentes technologies présentées dans cet ouvrage.

16.1 Aéroport de Zürich (Dock Midfield)

Le Dock Midfield est le nouveau terminal de l'aéroport de Zürich sur une surface de 15 000 m².

En raison de mauvaises conditions géologiques (terrain meuble formé par d'anciens fonds lacustres), le bâtiment a dû être construit sur 440 pieux de fondation. Les pieux sont de gros diamètres (de 90 à 150 cm) et sont fichés dans une couche de moraine de fond située à environ 30 mètres de profondeur. Dans le but de contribuer au chauffage et au refroidissement du bâtiment, plus de 300 pieux sont utilisés en pieux énergétiques. Le bâtiment a été mis en service en automne 2003.

16.1.1 Données techniques

- Demande de chauffage : 4 000 kW, 2 700 MWh/an ;
- Demande de refroidissement : 500 kW, 1 240 MWh ;
- Type de pieu : moulé en béton ;
- Diamètre pieux : 90-150 cm ;
- Nombre de pieux énergétiques : 306 ;
- Longueur moyenne active : 26,8 m ;
- Tubes échangeurs par pieu : 5 tubes en U ;
- Puissance soutirée : 49 W/m, 135 kWh (m/an) ;
- Puissance énergétique injectée : 40 W/m max, 58 kWh/m/an.

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

16.1.2 Performances mesurées :

Chauffage

- P extraction maxi W/m : 72 ;
- P extraction moyenne W/m : 45 ;
- Énergie an extraite kWh/m/an : 183.

Refroidissement

- P injection maxi W/m : 33 ;
- P injection moyenne W/m : 16 ;
- Énergie an injectée kWh/m/an : 74.

Indices de performance

- COP annuel : 3,9 ;
- COP global (avec *geocooling*) : 5,1
- Ratio injecté sur extrait : 41 %.

16.2 Champ de sondes à l'ENSTA Paris Tech (91 Palaiseau)

L'opération concerne le chauffage de 7 bâtiments dont un bâtiment école, cinq bâtiments de logements étudiants et un gymnase, le tout d'une surface de 30 800 m² environ. Pour assurer 50 % de la puissance maximale (450 kW), à savoir plus de 80 % des besoins, il a été constitué un champ de 75 sondes de 160 m de profondeur. Étant donné la configuration particulière du champ géothermique, les sondes sont réparties par groupes de 10 à 15 unités répartis en 7 regards disposés dans les zones vertes du projet (cf. *figure 16.1a*). Chaque regard dispose donc d'un collecteur aller et d'un collecteur retour alimentant une dizaine de circuits fermés montés en dérivation. Les départs vers les sondes sont munis de vannes de réglage permettant d'équilibrer le débit de fluide frigorigène en fonction des pertes de charges de chaque circuit individuel.

Les travaux de forage du champ de sondes géothermiques réalisés par la société MCCF (groupe Solétranche-Bachy) ont démarré en mai 2010 et se sont terminés fin octobre. Compte tenu des particularités du sous-sol (sables sans cohésion) les travaux ont été menés avec 2 foreuses disposant de doubles têtes de rotation qui permettent de forer en tubant à l'avancement (*figure 16.1b*).

Copyright © 2014 Dunod.

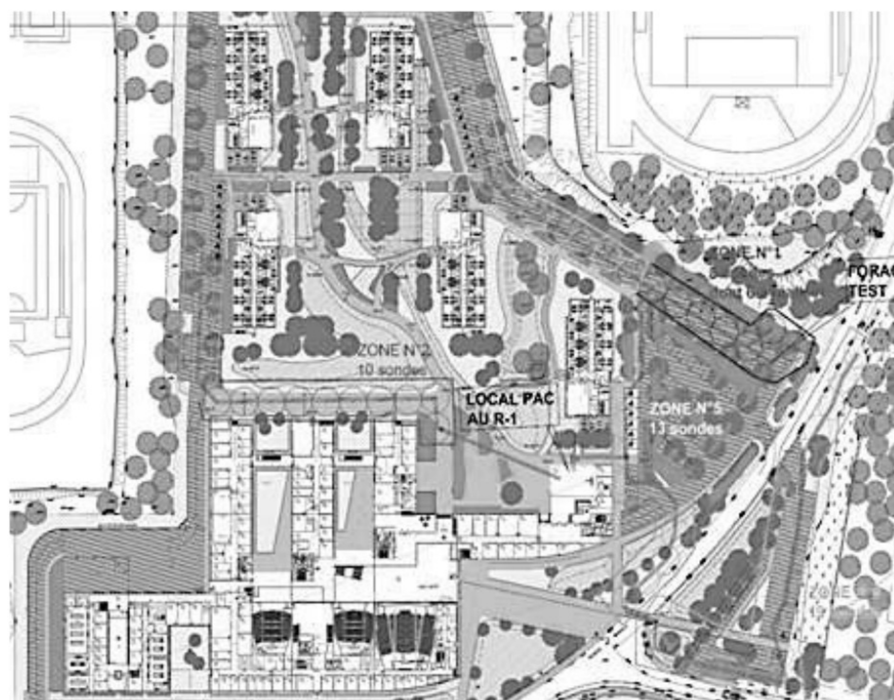


Figure 16.1a – Schéma partiel d'implantation des sondes ; travaux réalisés par la société MCCF (groupe Solétranche-Bachy)



Figure 16.1b – Équipement gravitaire de la sonde géothermique ; travaux réalisés par la société MCCF (groupe Solétranche-Bachy)

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

La méthodologie de forage finalement retenue est la suivante :

- préforage à la boue en diamètre 170 mm jusqu'à 70 m ;
- remontée du train de tige et outil en 170 mm et descente d'un tubage de diamètre standard 150 mm ancré jusqu'à 70 m ;
- forage à la boue en 130 mm de diamètre jusqu'à 160 m de profondeur ;
- remontée du train de tige et outil en 130 mm ;
- équipement gravitaire de la sonde géothermique (cf. *figure 16.1b*)
- extraction du tubage ;
- scellement de la sonde par coulis thermique (remplissage du forage par le fond).

Des capteurs solaires permettent une fourniture partielle d'eau chaude sanitaire. En période estivale, la circulation de l'eau des panneaux solaires non utilisés sur le campus est dirigée vers le champ de sonde, et apporte ainsi une sécurité complémentaire au dimensionnement. Cette solution technique élégante permet de soulager et d'allonger la durée de vie des panneaux solaires d'une part, et de participer au rechargement calorifique du sous-sol d'autre part.

16.3 Opération de géothermie à Blagnac

Cette opération (*figure 16.2*) exploite un aquifère en puits unique (45 m^3/h ; 59 °C). Le circuit primaire comporte deux échangeurs en série. Après un premier échange direct (E1), le retour à 43,8 °C alimente le deuxième échangeur (E2) source pour des évaporateurs en série de 4 pompes à chaleur.

La puissance prélevée dans l'aquifère par échange direct est égale à 2 665 kW, la puissance restituée au réseau est de 3 240 kW. Le COP de l'installation est de 5,25.

Copyright © 2014 Dunod.

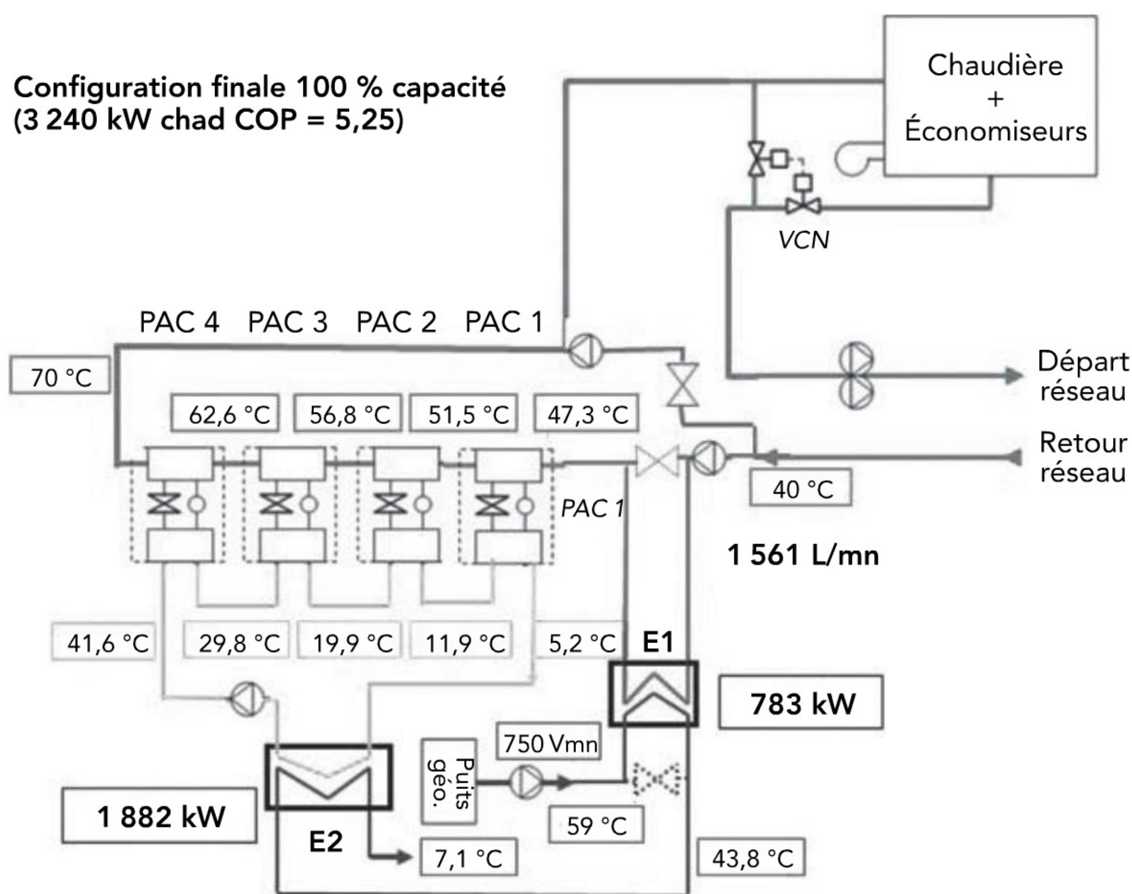


Figure 16.2 – Schéma hydraulique de l'opération de Blagnac

16.4 Chauffage climatisation maison de la radio (PAC sur aquifère)



Figure 16.3 – Maison de la Radio

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

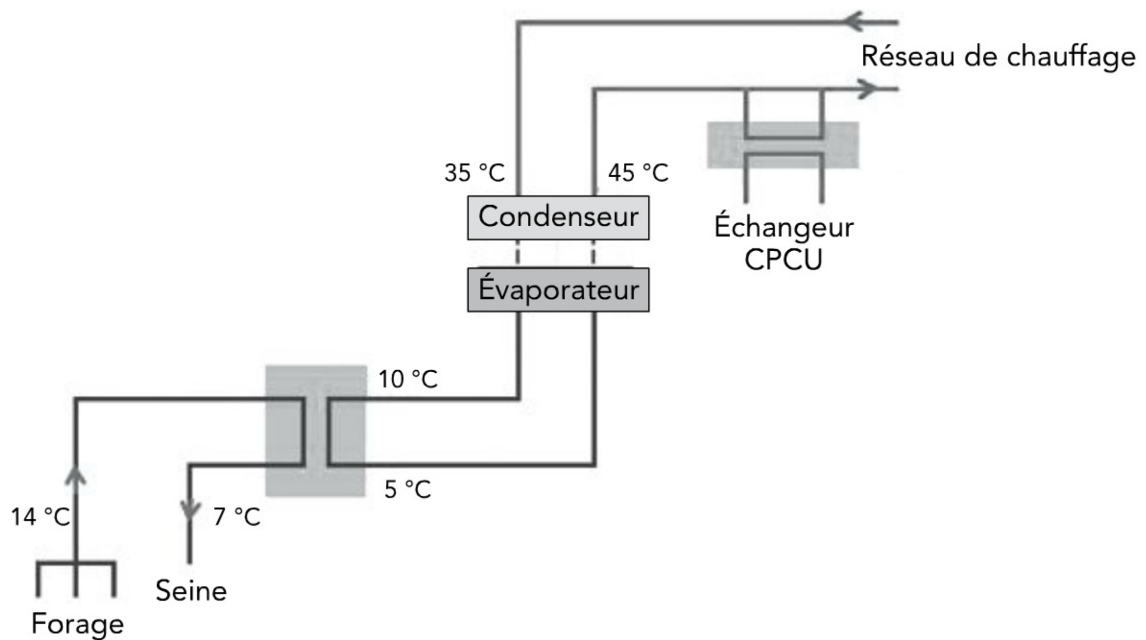


Figure 16.4 – Schéma de fonctionnement hiver

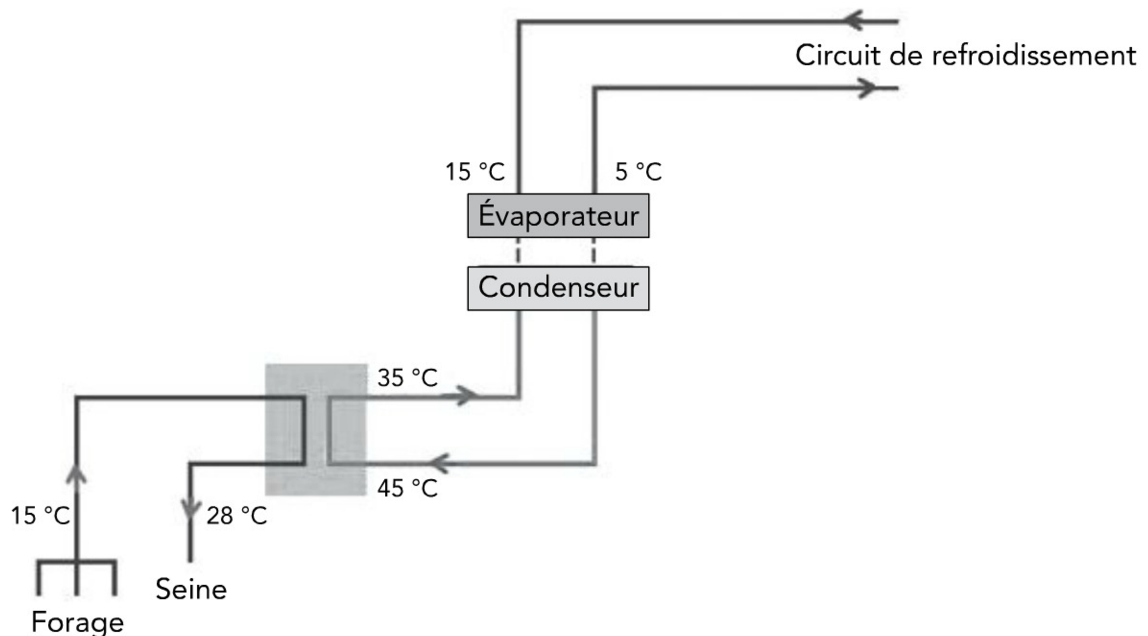


Figure 16.5 – Schéma fonctionnement été

Copyright © 2014 Dunod.

La maison de la radio (*figure 16.3*) a été pionnière dans l'utilisation de la géothermie, car dès 1963, elle a utilisé l'eau d'un aquifère (Albien) à 600 m de profondeur à une température de 27 °C, et cela à des fins de chauffage et de climatisation (*figure 16.4 et 16.5*). Au début de l'exploitation, les pompes à chaleur fonctionnaient à l'ammoniac et le système fut sans cesse amélioré, transformé et entretenu ; il fonctionnait encore début 2011. Une autre opération du même type existe également sur l'autre rive de la Seine pour chauffer et climatiser les

tours Mirabeau et Cristal selon le principe du puits chaud-puits froid. Devant la nécessité d'une réhabilitation lourde du système de production avec obligation de réaliser un forage de réinjection, la décision a été prise de continuer à utiliser la géothermie à partir de la nappe de la Craie moins profonde en liaison avec les alluvions de la Seine. Trois forages ont été réalisés, susceptibles de produire 400 m^3/h d'eau à 15-16 °C.

L'installation est équipée de 4 pompes à chaleur d'une puissance totale installée de 4 800 kW. Le COP de l'installation est de 4,1. Une sous-station CPCU (Compagnie parisienne de chauffage urbain) assure un complément de puissance pendant les jours les plus froids.

16.5 Centre de maintenance des tramways de Tours (fondations géothermiques)

Conception ÉCOME ingénierie. Mise en œuvre des pieux énergétiques : GÉOTHERMIE PROFESSIONNELLE.

Pour assurer ses besoins de chauffage et de rafraîchissement de 1 900 m² de bureaux, le centre de maintenance des tramways de Tours (*figure 16.6*) a prévu la mise en place de fondations thermoactives.



Figure 16.6 – Centre des tramways de Tours

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

Le début des travaux a eu lieu en mai 2011. La mise en œuvre des pieux énergétiques a été effectuée en juillet 2011. La livraison du bâtiment est prévue pour juin 2012.

Ces fondations sont équipées de 50 pieux équipés de 15 m de profondeur.

Les besoins énergétiques ont été définis :

- Puissance chauffage : 33 kW ;
- Puissance en rafraîchissement : 60 kW ;
- COP : 5 ;
- Énergie de chauffage produite par les pieux énergétiques : 38 945 kWh ;
- Énergie de rafraîchissement produite par les pieux énergétiques : 19 480 kWh :
  - couverture des besoins énergétiques : ~ 100 %,
  - coût de l'équipement thermoactif des pieux : 36 K€.

La simulation validant l'adéquation ressources-besoins est présentée dans la *figure 16.7* :

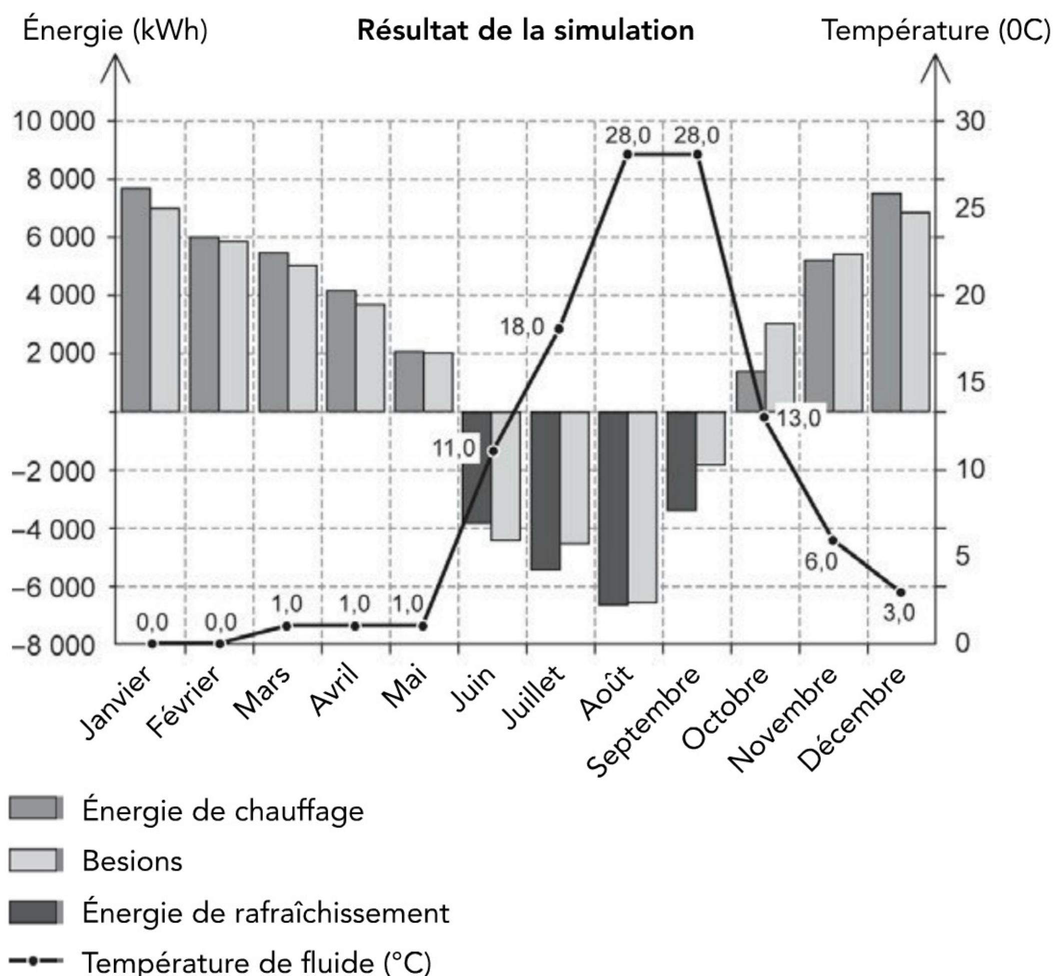


Figure 16.7 – Simulation des besoins énergétiques sur l'année

Copyright © 2014 Dunod.

Température du fluide : il s'agit de la température moyenne du fluide caloporteur (entre aller et retour) au cours d'un cycle annuel. Elle baisse lorsqu'on capte les calories en hiver, et elle monte lorsqu'on en réinjecte en été.

16.6 Résidence Saint-Georges 78 Limay (fondations géothermiques)



Figure 16.8 – Résidence Saint-Georges (source : ÉCOME)

La résidence réalisée par le bailleur social EFFIDIS comporte 23 logements (*figure 16.8*).

Un système thermoactif a été mis en place par l'intermédiaire de 55 pieux de fondations. L'équipement des 55 pieux alimente une pompe à chaleur de 24 kW qui permet de couvrir 73 % des besoins en chauffage.

Le *tableau 16.1* compare la solution de référence avec la solution adoptée qui a été labellisée BBC-Effinergie.

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

Tableau 16.1 – Tableau comparatif avec/sans système thermoactif

	Sans pieux géothermiques	Avec pieux géothermiques
Mode de chauffage	Chaudière condensation et capteurs solaires	Chaudière condensation, capteurs solaires et PAC sur pieux géothermiques
Label de performance	HPE 2005	BBC Effinergie
CEP (kWhep/m^2.an)	84	62 (-26 %)
Émissions GES (kgéqCO_2/m^2.an)	17	8 (-53 %)
Consommation énergie annuelle	5 324 €	3 261 €
Coût entretien annuel	4 250 €	5 000 €
Coût total annuel	9 574 €	8 261 (-14 %)
Rafraîchissement	Non	Par *free cooling* sans surcoût

16.7 La Seyne-sur-Mer (PAC sur eau de mer)

Cette installation d'échangeurs eau de mer alimente en chauffage et climatisation 54 000 m^2 de tertiaire et logements. L'opération réceptionnée en 2009 a été réalisée sur le site des anciens chantiers navals à la Seyne-sur-Mer (83). L'installation d'échange eau de mer possède une capacité d'échange de 4,8 MW (*figure 16.9*).

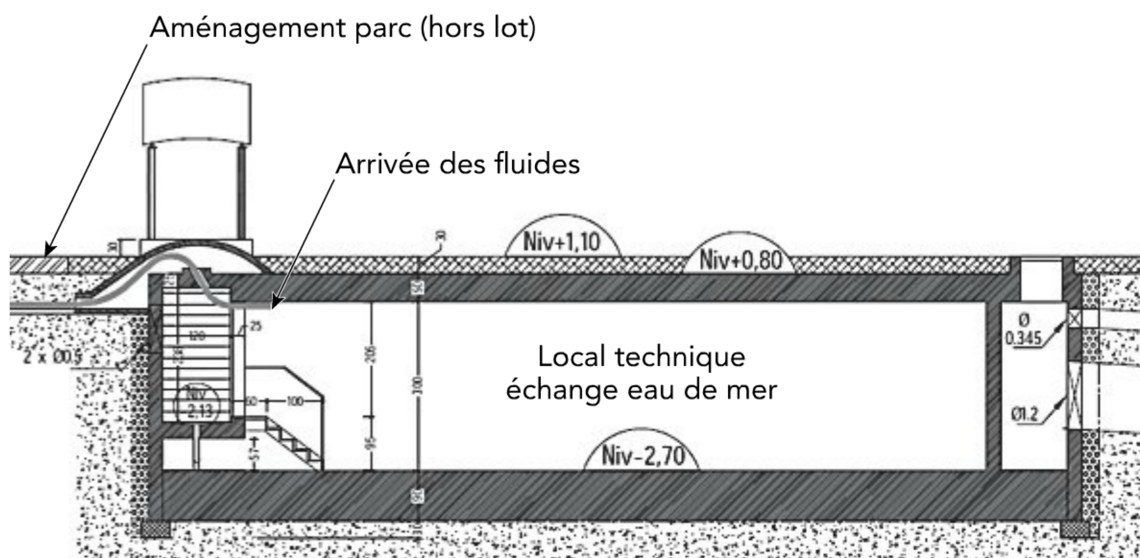


Figure 16.9 – Coupe du local technique eau de mer

Copyright © 2014 Dunod.

Les températures extrêmes de captage et de rejet eau de mer sont fonction des saisons :

- température de captage (–5 m) : 15 °C (hiver) ≤ captage ≤ 22 °C (été) ;
- température de rejet : 9 °C (hiver) ≤ rejet ≤ 32 °C (été).
- **Soit un delta T de 6 °C entre captage et rejet eau de mer.**
- température d'eau réfrigérée (hiver) – Entrant : 13 °C – Sortant : 7 °C ;
- température d'eau réfrigérée (été) – Entrant : 24 °C – Sortant : 32 °C.
- **Soit un delta T de 6 °C entre aller et retour.**

Le local technique est ainsi composé :

- 3 pompes eau de mer de 160 m³/h avec variateurs de débit ;
- 3 pompes eau réfrigérée de 160 m³/h ;
- 3 pré-filtres en amont des pompes eau de mer ;
- 3 filtres à sable automatiques en amont des échangeurs eau de mer ;
- 3 échangeurs à plaques en titane d'une capacité d'échange de 1 600 kW, soit 4 800 kW ;
- rejet eau de mer en tube PVC et PEHD Æ 315 mm ;
- boucle « eau réfrigérée » après échange eau de mer en PEHD DN 300 mm.

16.8 Système de récupération de chaleur sur les eaux grises d'un restaurant d'entreprise (Cergy Pontoise)

Le système récupère les eaux grises provenant du restaurant d'entreprise (600 couverts) ainsi que les eaux de tous les lavabos d'une tour IGH, ces eaux sont séparées des eaux noires (des toilettes).

Les eaux usées ont une température de 15/35 °C ; elles passent au travers d'un échangeur. Les calories sont captées et transférées aux PAC à puissance variable s'adaptant ainsi aux flux d'évacuation des eaux grises. En ce qui concerne le condenseur, l'eau chaude sanitaire est réchauffée et stockée dans un ballon à 55 °C avec intervention d'une chaudière d'appoint si nécessaire.

Le débit moyen des eaux grises issues du restaurant est de 5 à 10 m^3/jour. La puissance thermique des PAC est de 56 kW. Le COP de la PAC est de 4,2 et la couverture des besoins d'ECS est assurée à 90 %.

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.



Figure 16.10 – Installation de récupération de chaleur sur eaux grises Cergy (source : Biofluides Environnement)

16.9 Récupération de la chaleur des eaux grises d'un immeuble collectif à Ermont (95)

Le système de récupération d'eaux usées s'applique à un immeuble neuf de 32 logements bénéficiant d'un label BBC. Les eaux usées récupérées proviennent des salles de bains et cuisines des appartements.

L'eau récupérée à une température moyenne de 27 °C est dirigée dans un réservoir de stockage de 1 350 litres permettant de retenir la chaleur des eaux usées sans interrompre leur écoulement. Par le biais d'un échangeur, la chaleur est transférée vers deux pompes à chaleur de 17 et 13 kW produisant de l'eau à 40 °C dans un ballon de préchauffage de 1 000 litres. Le faible écart de température permet d'atteindre un COP élevé supérieur à 5. La température de l'eau est ensuite portée à la température souhaitée : 55 °C.

Copyright © 2014 Dunod.

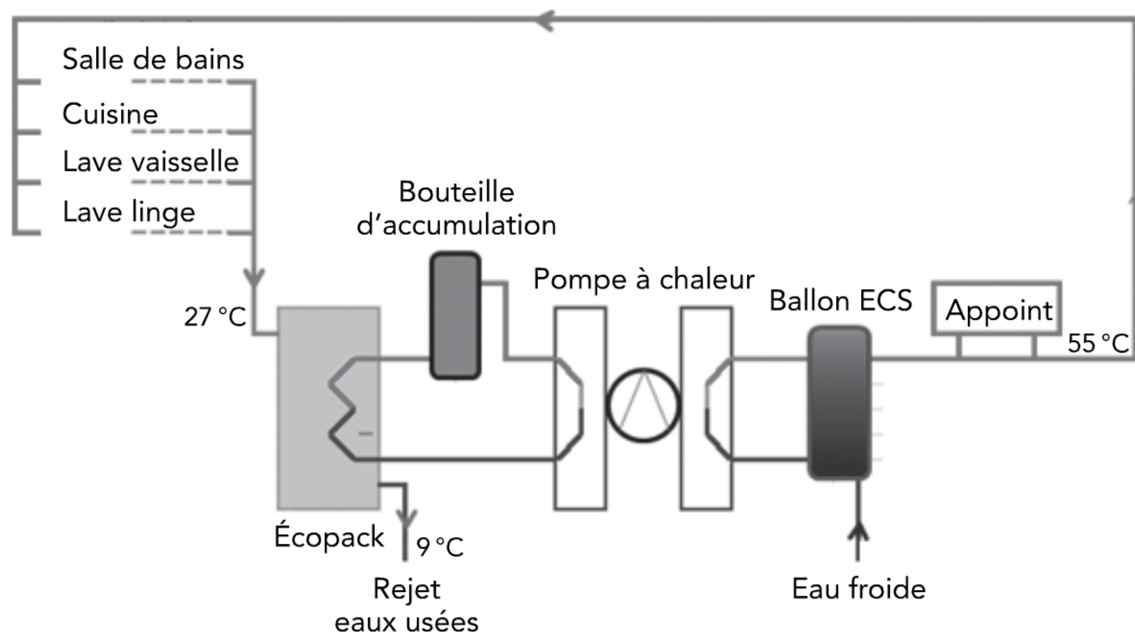


Figure 16.11 – Schéma simplifié de récupération de chaleur sur eaux usées

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

Copyright © 2014 Dunod.

17 Bilans énergie primaire et environnemental

La France a pris un certain nombre d'engagements en matière énergétique et environnementale. Ces engagements ont été confirmés dans le cadre du Grenelle de l'Environnement.

C'est tout d'abord la réduction par un facteur 4 de nos émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050.

Au niveau européen, l'objectif affiché est de limiter le réchauffement climatique à 2 degrés d'ici 2100. Le paquet « énergie climat » approuvé par le conseil européen se décline de la manière suivante :

- augmentation de 20 % de l'efficacité énergétique d'ici 2020 ;
- réduction de 20 % des émissions de GES d'ici 2020, voire de 30 % en cas d'accord international ;
- atteindre une proportion de 20 % d'énergies renouvelables dans la consommation énergétique totale de l'UE d'ici 2020 (actuellement à 8,5 %). Sur ce volet, la France s'est fixé un objectif plus ambitieux de 23 %.

Les bilans énergétiques et environnementaux détaillés dans ce chapitre apportent la démonstration de la contribution significative susceptible d'être apportée par la filière « pompes à chaleur » aux objectifs nationaux.

17.1 Bilan énergie primaire pour une maison individuelle

Le bilan énergie primaire s'appuie sur les données conventionnelles suivantes :

1 kWh élec = 2,58 kWhep (rdt : 38,7 %)

Pour le gaz, le rendement de production et distribution est considéré comme égal à 1.

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

On note en général un meilleur résultat pour la pompe à chaleur que pour le gaz. Comme le montre la *figure 17.1*, le résultat est cependant très dépendant du COP global de la PAC qui ne doit pas descendre au-dessous de 2,3 pour garder un avantage en énergie primaire.

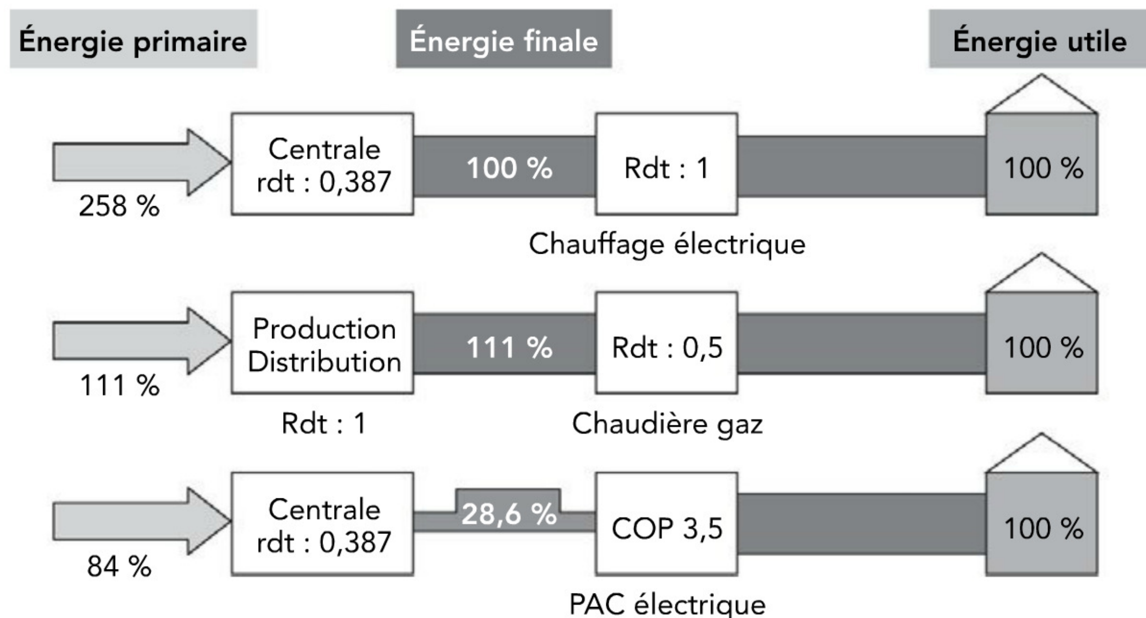


Figure 17.1 – Comparaison des bilans en énergie primaire des différents systèmes de chauffage

17.2 Bilan environnemental

Le calcul des émissions de gaz à effet de serre d'une pompe à chaleur doit tenir compte de celles dues au fluide frigorigène dont le GWP peut être important (effet direct). En effet, sur la durée de vie de la PAC, il est pris comme hypothèse un taux de fuites de 4 %, et un taux de récupération en fin de vie de l'ordre de 80 %. L'effet direct est celui généré par la consommation d'électricité, à savoir 180 g/kWhelec (valeur généralement admise pour le chauffage).

Les quantités de fluide frigorigène varient suivant la nature des sources et du principe d'échange au niveau du condenseur et de l'évaporateur.

Quelques ordres de grandeur :

- pompe à chaleur **eau/eau** (aquifère ou sondes eau glycolée) : 125 g/kW ;
- pompe à chaleur à **détente directe** (fluide frigorigène circulant dans les capteurs) : 1 250 g/kW ;
- pompe à chaleur **air/air** : 500 g/kW.

Copyright © 2014 Dunod.

Le *tableau 17.1* fait une comparaison des différents systèmes.

Tableau 17.1 – Bilan environnemental des différents systèmes de chauffage

		PAC aquifère ou sondes verticales	PAC détente directe capteurs horizontaux	PAC sur air	Solution tout électrique	Solution gaz
Puissance thermique	kW	10	10	10	10	10
Besoins utiles	kWh	20 000	20 000	20 000	20 000	20 000
COP rendement		3,5	3,5	3	1	0,8
Quantité fluide frigo	kg	1,25	12,5	5		
Consommation						
Électricité	kWh	5 714	5 714	6 667	20 000	
gaz	kWh PCS					
Émissions liées au fluide frigorigène	Kg CO_2/an	95	950	380		
Émissions liées à l'énergie	Kg CO_2/an	1 029	1 029	1 200	3 600	5 833
Total émissions	Kg CO_2/an	**1 124**	**1 979**	**1 580**	**3 600**	**5 833**

On note que quelle que soit la technologie utilisée, les PAC sont nettement plus performantes en matière d'émissions de gaz à effet de serre que les solutions traditionnelles gaz et électrique.

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

Copyright © 2014 Dunod.

18 Montage d'un projet de pompe à chaleur

La structure présentée s'applique ici particulièrement aux PAC sur aquifère dont le montage est le plus complexe. La chronologie des phases s'applique néanmoins à tous types de projets.

18.1 Différentes phases du montage d'un projet PAC

Le montage d'un projet comporte plusieurs phases qu'il convient de respecter scrupuleusement.

Phase 1 : identification du projet

- Définition des objectifs ;
- Prise d'information (M.O installations existantes, ADEME…) ;
- Choix d'un prestataire chargé de la pré-étude ;
- Pré-étude de faisabilité (définition des variantes à étudier) ;
- Décision de principe :
  - poursuite (solution retenue).

Phase 2 : validation technico-économique du projet

- Définition du cahier des charges pour l'étude de faisabilité (assistance éventuelle d'un AMO) ;
- Lancement de l'appel d'offres pour l'étude de faisabilité ;
- Réalisation de l'étude de faisabilité :
  - évaluation des besoins (chaud, froid, ECS),
  - détermination des quantités d'énergie mobilisables (ressources locales),
  - conditions d'accès à la ressource,

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

  - ▹ contraintes spécifiques (techniques environnementales, réglementaires…),
  - ▹ évaluation de l'adéquation ressources/besoins,
  - ▹ évaluation des investissements et coûts d'exploitation,
  - ▹ établissement du compte d'exploitation prévisionnel,
  - ▹ établissement des ratios financiers : VAN, TRI ;
- Rapport de synthèse ;
- Décision : réalisation ou arrêt.

Phase 3 : validation technico-économique du projet

- Montage juridique ;
- Détermination des conditions d'exploitation :
  - ▹ mode de gestion,
  - ▹ contrat d'exploitation ;
- Montage financier.

Phase 4 : réalisation et suivi

- Lancement appel d'offres « fournisseurs »
- Lancement des travaux
- Mise en place d'une procédure de suivi
- Réception des ouvrages
- Mise en service
- Évaluation du projet

18.2 Cahier des charges étude de faisabilité (exemple PAC sur aquifère)

1 – Contexte et présentation du site

- Présentation générale ;
- Localisation géographique ;
- Données architecturales (type de bâtiment, surfaces, activités…) ;
- Joindre plan.

Copyright © 2014 Dunod.

2 – Analyse du contexte hydrogéologique

- Description des formations aquifères présentes au droit du site ;
- Forages déclarés à proximité du site ;
- Ressources potentielles (principaux paramètres d'exploitabilité) ;
- Contexte réglementaire.

3 – Définition des besoins

- Hypothèses retenues ;
- Inventaire et caractéristiques du bâtiment nécessitant des besoins de chauffage et de refroidissement à partir des données architecturales fournies, concernant notamment le théâtre et les salles de sport ;
- Évaluation des besoins (chauffage – refroidissement – ECS).
  - Chauffage

Puissance f (Tex) (1) kW	W/m²	Consommation kWh	kWh/m²

(1) température extérieure la plus basse.

  - Besoins de froid

Puissance f (Tex) (1) kW	W/m²	Consommation kWh	kWh/m²

  - Eau chaude sanitaire

Consommation kWh	m^3	Consommation kWh/m^3 :	kWh/m²

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

4 – Adéquation ressources-besoins

- Évaluation des débits nécessaires pour satisfaire tout ou partie des besoins ;
- Différentes solutions envisageables ;
- Sensibilité aux paramètres caractérisant la ressource.

5 – Description de(s) la solution(s) envisagée(s)

- Choix de l'aquifère à capter :
  - débit (pompage et artésianisme),
  - profondeur,
  - température,
  - minéralisation ;
- Localisation des forages sur le site ;
- Caractéristiques de la (ou des) PAC (puissances, COP, EER…) ;
- Caractéristiques des émetteurs terminaux compatibles (CTA, émetteurs hydrauliques, aérauliques…), lois de régulation.

6 – Exploitation et mode de gestion retenus

- Implantation du site de forage (contraintes de forage…) ;
- Conditions de rejet ;
- Écartement des forages si réinjection ;
- Coupe technique et programme des forages ;
- Définition des équipements :
  - dispositifs de pompage et de variation de vitesse,
  - systèmes d'échange ;
- Simulation des transferts thermiques au niveau du doublet (éventuellement forages voisins) ;
- Contraintes réglementaires spécifiques ;
- Dossier de garantie Aquapac.

7 – Chiffrage des investissements (équipements ; pour la ou les solutions retenues)

- Forages ;
- Systèmes de pompage et variateurs ;
- Systèmes d'échange ;

Copyright © 2014 Dunod.

- PAC ;
- Liaisons hydrauliques ;
- Autres équipements ;
- etc.

Subventions ADEME – Conseil régional

8 – Coûts d'exploitation

- Énergie :
  - électricité de pompage,
  - électricité PAC + auxiliaires,
  - électricité de distribution,
  - appoint ;
- Conduite entretien ;
- Gros entretien renouvellement ;
- Visites périodiques (réglementaires) ;
- Gestion ;
- Assurances (garantie SAF, RC…) ;
- Taxes ;
- Divers.

9 – Analyse économique

- Conditions de financement (fonds propres, emprunts, subventions) ;
- Définition d'une solution de référence (chaudière gaz + groupe frigo par exemple) ;
- **Indicateurs synthétiques :**
  - temps de retour (brut, net),
  - VAN, TRI ;
- **Compte d'exploitation prévisionnel** : il s'agit de comparer la solution de référence, à une solution de conversion à la géothermie.

10 – Synthèse – conclusion

- Bilans énergétiques ;
- Bilans environnementaux ;
- Bilans économiques.

Choix d'une solution optimale.

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

Solutions de repli en cas d'insuffisance de ressources.

11 – Démarches administratives

- Déclaration, autorisation.

12 – Planning prévisionnel de réalisation

Copyright © 2014 Dunod.

Bibliographie

BERANGER B., *Les pompes à chaleur*, Éditions Eyrolles.

BERNIER J., *Chauffage et rafraîchissement par pompe à chaleur*, PYC Éditions, 2007.

DESMONS J., *Génie Climatique*, 2e édition, Éditions DUNOD, 2009.

JAUDIN F., *Eaux souterraines et pompes à chaleur*, Éditions BRGM.

LAPLAIGE P., LEMALE J., *Géothermie Techniques de l'Ingénieur*, 2008.

LAPLAIGE P., LEMALE J., *Géothermie de surface Techniques de l'Ingénieur*, 2009.

LEMALE J., *La géothermie* (2e édition), Éditions DUNOD 2012.

PIATTI A A., PIEMONTE C., SZEGO E., *Planning of géothermal district heating systems.*

GINGER CATED, « Solutions géothermiques (2e édition) par pompes à chaleur », 2011.

Guide technique Pompe à chaleur géothermique sur Aquifère. Conception et mise en œuvre ADEME – ARENE - BRGM Éditions 2008.

Capteurs géothermiques verticaux pour pompes à chaleur. Aspects réglementaires, règles de l'art et qualification des entreprises de forage. Rapport BRGM - 53675 2005.

Conception des fondations géothermiques CSTB - Rapport ADEME 2007.

Revues trimestrielles :

L'énergie du sous-sol en Île-de-France ADEME IdF, ARENE, BRGM 2002 – 2009.

La géothermie en France ADEME, BRGM 2009-2011.

Portail Internet :

Géothermie perspectives (ADEME, BRGM) : www.geothermie-perspectives.fr

www.xpair.com

www.afpac.org

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

Copyright © 2014 Dunod.

Glossaire

A

Aquifère : formation géologique contenant, de façon temporaire ou permanente, de l'eau mobilisable, constituée de roches perméables et capables de la restituer naturellement et/ou par exploitation.

Annulaire (espace) : au niveau d'un forage équipé, l'annulaire concerne la zone située entre le tubage et le terrain naturel. Cette notion peut s'étendre à l'espace situé entre 2 tubages concentriques.

Artésianisme : caractéristique d'un aquifère captif : niveaux piézométriques initiaux situés au-dessus du toit de l'aquifère.

Azéotropique : se dit d'un fluide frigorigène qui change d'état à température constante.

C

Capacité massique : c'est la quantité d'énergie à apporter pour augmenter d'un degré la température d'une substance. unité : $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

Chaleur latente : chaleur résultant d'un changement d'état de la substance accumulatrice, sans changement simultané de température.

Cimentation : opération consistant à remplir un espace déterminé avec un coulis de ciment.

Coefficient U : coefficient de transmission surfacique d'une paroi qui caractérise le flux de chaleur à travers un mètre carré de paroi pour une différence de température d'un degré entre les deux ambiances que séparent cette paroi. Plus le coefficient est grand, plus la chaleur transmise est grande ; s'exprime en $W/m^2.°C$.

Conduction : mécanisme où la chaleur se transmet de proche en proche au sein d'un milieu. La chaleur correspond, au niveau atomique, à une agitation des

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

atomes. Cette agitation se transmet d'atomes en atomes, les atomes agités en « heurtant » les atomes voisins augmentent leur niveau de désordre, donc leur niveau d'énergie. Lors de la conduction, il y a transfert de chaleur sans déplacement de matière.

Conductivité thermique : en physique, la conductivité thermique est la grandeur introduite pour quantifier l'aptitude d'un corps à conduire de la chaleur. Elle représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par unité de temps sous l'action d'une différence de température entre les deux extrémités d'un échantillon ; elle s'exprime en $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

Convection : déplacement de matière d'une zone chaude vers une zone froide qui sera alors réchauffée. C'est le déplacement de matière chaude qui provoque le transfert de chaleur, donc l'élévation de température. Cette conduction s'observe lorsque l'on chauffe un volume d'eau sur une plaque chauffante. L'eau chaude, moins dense, remonte en surface ; l'eau froide, plus froide, redescend. Lors de la convection, il y a transfert de chaleur par déplacement de matière chaude.

Crépine : tube ajouré mis en place dans un forage lors des opérations de complétion. La crépine (ou tubage crépiné) permet le passage de l'eau tout en maintenant la formation productrice.

D

Débit nominal d'une pompe : débit d'une pompe correspondant à son fonctionnement optimal. Chaque pompe est caractérisée par une courbe de fonctionnement établie en fonction du débit et de la Hauteur Manométrique Totale.

Degrés-jours : la valeur de degré-jours de chauffage pour un jour donné est l'écart entre une valeur conventionnelle de la température intérieure (dite température intérieure de base - habituellement 18 °C) et la température extérieure moyenne (plus faible) du même jour. Pour une période donnée, c'est la somme, jour par jour, de l'écart entre la température intérieure de base et la température extérieure quotidienne moyenne.

Dogger : étage géologique (Jurassique Moyen) : les calcaires du Dogger constituent de bons aquifères dans le bassin parisien et sont exploités pour la géothermie basse enthalpie.

Doublet : ensemble de deux forages associés, l'un étant dédié à la production (pompage de l'eau de nappe), l'autre à la réinjection dans l'aquifère d'origine. Ce

Copyright © 2014 Dunod.

dispositif d'exploitation permet d'éviter de rejeter en surface des eaux chargées en sel et de maintenir la piézométrie du réservoir exploité.

Dureté : la dureté ou titre hydrotimétrique (TH) représente la concentration en ions alcalino-terreux (Ca++, Mg++) présents dans l'eau. La dureté s'exprime en milliéquivalents de concentration en $CaCO_3$ ou en degrés français (°F).

E

Effusivité thermique : elle est donnée par la formule : où λ est sa conductivité thermique, ρ sa masse volumique, et c sa capacité thermique massique. L'unité S.I. d'effusivité est le $(J/K/m^3)\cdot(m^2/s)$. L'effusivité d'un matériau est sa capacité à échanger de l'énergie thermique avec son environnement.

Énergie « utile » : elle constitue la part servant effectivement à l'usage voulu par le consommateur (chaleur, lumière, force motrice…). Elle et elle seule « sert vraiment à quelque chose », car c'est elle qui satisfait le « besoin » initial, celui qui a engendré la demande d'énergie.

Énergie « finale » : elle est mise à la disposition des consommateurs sous une forme directement utilisable. Elle se mesure, lors de l'achat, en litres de fioul, en m^3 de gaz, en kWh électriques… La consommation d'énergie « finale » correspond à la quantité d'énergie mesurée au compteur du consommateur (compteur électrique, gaz, pompe à essence…). La différence entre la consommation « finale » et la consommation d'énergie « utile » dépend du rendement des appareils utilisés.

La consommation d'énergie « primaire » : elle correspond à la quantité qu'il a fallu prendre dans la nature pour mobiliser l'énergie, la transformer sous la forme utilisable par le consommateur et la transporter jusqu'à lui. La différence entre la consommation d'énergie « primaire » et la consommation d'énergie « utile » correspond aux pertes d'énergie :

- dans l'extraction et la transformation de l'énergie primaire ;
- dans le transport de l'énergie jusqu'au lieu de consommation ;
- dans l'appareil utilisé par le consommateur.

Enthalpie : quantité de chaleur contenue par unité de poids. L'unité est exprimée en Joule/kg.

EVI (*Enhanced Vapor Injection*) : injection de vapeur au cours du cycle de compression qui a pour conséquence de diminuer la température des gaz surchauffés

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

en sortie de compresseur et permettre de produire de l'eau à une température supérieure à 60 °C.

F

***Free cooling* :** consiste à faire circuler le fluide de la source froide dans l'émetteur rafraîchissant. Lorsque la source est l'eau du sous-sol ou eau glycolée issue de capteurs, on désigne cette opération sous le terme de *geocooling*.

G

Géothermie : c'est l'utilisation de la chaleur naturelle de la Terre, en tant que source d'énergie locale, concurrentielle, durable et acceptable du point de vue écologique et social, pour produire de l'électricité et pour des applications directes de la chaleur.

Grenelle de l'environnement : négociations politiques organisées en France en 2007 sous l'impulsion du gouvernement Fillon, ayant comme objectif de réunir l'ensemble des responsables des secteurs concernés par les questions environnementales (gouvernement, ONG, associations professionnelles) afin de prendre des décisions à long terme.

H

Hauteur Manométrique Totale (HMT) : hauteur maximale de refoulement d'une pompe intégrant des pertes de charge.

I

Interférence : recouvrement des aires d'influence de deux ou plusieurs ouvrages en production, imposant à chaque ouvrage une influence piézométrique (rabattement) ou/et thermique non négligeable, déterminée par l'action des autres.

Inverter : dispositif de commande électronique destiné à faire varier la vitesse d'un moteur électrique.

K

Karstique (aquifère) : aquifère dont les conditions et le comportement correspondent au karst : hétérogénéité, discontinuités (compartimentage du réservoir),

Copyright © 2014 Dunod.

prédominance de l'écoulement des eaux souterraines par chenaux et conduits de grande dimension (conduits karstiques).

M

Marteau Fond de Trou (MFT) : méthode de foration à l'air qui utilise la percussion assortie d'une poussée sur l'outil qui se trouve lui-même en rotation.

Massif filtrant : il s'agit d'un massif de gravier ou de sable mis en place entre la crépine et le terrain dans le but d'empêcher le passage des éléments les plus fins de l'aquifère capté.

Mollier (diagramme) : diagramme qui permet de décrire le cycle thermodynamique, à savoir l'évolution des pressions, températures, enthalpie et état physique (liquide, gazeux)

N

Nappe superficielle : la notion de nappe superficielle ou nappe phréatique, imprécise au plan hydrogéologique, caractérise généralement une nappe peu profonde atteinte par les puits ordinaires.

Niveau dynamique (unité : m) : du plan d'eau rabattu ou relevé, stabilisé ou non, dans un puits de pompage ou un ouvrage d'injection.

Niveau piézométrique (unité : m) : niveau libre de l'eau mesuré dans un ouvrage en communication avec un .

Niveau statique (unité : m) : non influencé dans un puits, un piézomètre, auquel se réfère le ou le relèvement. S'oppose à un influencé

P

PEHD : abréviation de .

Perméabilité : aptitude d'un milieu à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de potentiel.

PET : abréviation du Polyéthylène Téréphtalate.

PVC : abréviation de Polychlorure de Vinyle.

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

R

Rabattement : abaissement du niveau supérieur de la nappe engendré par aspiration du pompage. La courbe de rabattement permet de définir le débit maximal d'exploitation. Le rabattement observé dans un puits en pompage est la somme de la perte de charge dans l'aquifère et des pertes de charges dues au puits.

Résistivité (unité : ohm · cm) : la résistivité est l'inverse de la conductivité ; elle est mesurée en ohms · cm (Ω · cm).

Rotary : méthode de foration qui utilise un outil (trépan), animé d'un mouvement de rotation par les tiges de forage et de translation verticale sous l'effet du poids du train de tiges. Les tiges creuses permettent l'injection d'un fluide (air/eau/boue) qui a entre autres pour objet d'évacuer les débris de foration (*cuttings*).

S

Source froide : milieu où l'on puise des calories à base température.

Source chaude : milieu où l'on restitue les calories à une température supérieure à celle de la source froide.

T

Titre hydrométrique : voir dureté.

Transmissivité (unité : m^2/s) : paramètre régissant le débit d'eau qui s'écoule par unité de largeur, d'un aquifère, sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique. Il évalue la fonction conduite de l'aquifère. La transmissivité est égale au produit du coefficient de perméabilité, K, par l'épaisseur de l'aquifère. Elle s'exprime en $m^2/s \cdot T_{(m^2/s)} = K_{(m/s) \cdot b(m)}$

Tubage à l'avancement (TAL) : méthode de foration qui permet la mise en place d'un tubage des parois du trou au fur et à mesure de sa foration.

U

Ubât : déperdition thermique totale d'un bâtiment et additionne les déperditions thermiques de toutes les parois. La RT 2005 impose à chaque bâtiment que sa déperdition thermique totale soit inférieure à une valeur maximale : $Ubât_{max}$.

Copyright © 2014 Dunod.

V

Ventilo-convecteurs : appareils de chauffage ou de rafraîchissement constitués par un ou deux échangeurs dans lesquels circule soit du fluide chaud, soit du fluide froid. Ce fluide peut être soit de l'eau, soit un fluide frigorigène.

VMC hygroréglable : elle adapte les débits d'air en fonction du taux d'humidité intérieure de la pièce.

VMC Hygroréglable type A : elle associe des bouches hygroréglables (débit variable) et des entrées d'air autoréglables (débit fixe).

VMC Hygroréglable type B : elle associe des bouches hygroréglables et des entrées d'air hygroréglables permettant un gain thermique plus important que la VMC hygro A.

W

Watt (W) : puissance développée par 1 joule pendant 1 seconde.

Watt heure (Wh) : énergie représentant le travail d'une machine d'une puissance de 1 watt pendant 1 heure.

Z

Zéotropique : se dit d'un fluide dont la température varie pendant le changement de phase.

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

Copyright © 2014 Dunod.

ANNEXES

Copyright © 2014 Dunod.

Copyright © 2014 Dunod.

Réglementation 1

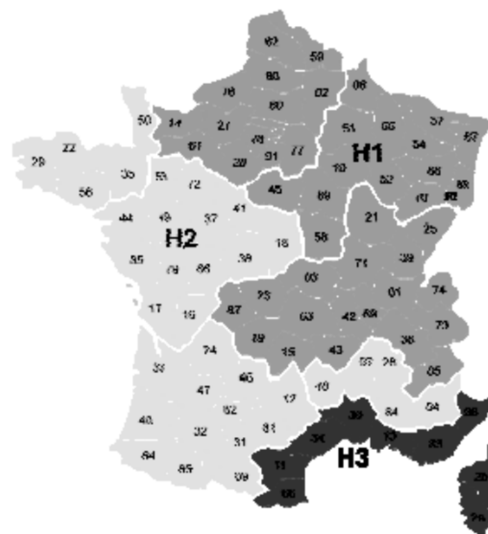
Réglementation thermique 2012 (éléments principaux)

La pompe à chaleur grâce à son COP élevé est un des générateurs privilégiés pour répondre aux exigences de la RT 2012. Bien entendu, les installations de géothermie du fait de leur meilleur COP sont mieux placées comparativement aux pompes à chaleur aérothermiques.

La réglementation thermique 2012 succède à la réglementation 2005. Elle est applicable depuis le 28 octobre 2011 pour les catégories du secteur tertiaire suivantes : bureaux, enseignement primaire et secondaire, cités universitaires, foyers de jeunes travailleurs ainsi que pour les habitations situées en zones urbaines sensibles (ANRU). Elle sera applicable pour les habitations (hors zones ANRU) à partir du 1er janvier 2013.

Alors qu'entre 1974 et 2005 la consommation spécifique des logements neufs n'a été divisée que par 2, la valeur moyenne exigée par la RT 2012 par rapport à 2005 est divisée par 2, voire par 3 pour certaines catégories (*cf. figure ci-dessous*).

Zones climatiques	RT 2005 (Cmax en logement)		RT 2012
	Chauffage par combustibles fossiles	Chauffage électrique (dont pompes à chaleur)	Valeur moyenne
H1	130	250	60
H2	110	190	50
H3	80	130	40



Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

La valeur moyenne est modulée en fonction de la localisation géographique, de l'altitude, du type d'usage du bâtiment, de sa surface pour les logements, et des émissions de gaz à effet de serre des bâtiments.

Exigences de résultats en termes de performance énergétique globale

Exigence d'efficacité énergétique minimale du bâti Bbiomax :

- Exigence de limitation du besoin en énergie pour les composantes liées au bâti (chauffage, refroidissement et éclairage)

Exigence de consommation maximale Cepmax :

- Exigence maximale de consommation d'énergie primaire à 50 kWhEP/$m^2 \cdot$ an en moyenne ; 5 usages pris en compte : chauffage, production d'eau chaude sanitaire, refroidissement, éclairage, auxiliaires (ventilateurs, pompes).

Exigence de confort d'été Tic :

- Exigence sur la température intérieure atteinte au cours d'une séquence de 5 jours chauds inférieure à une température de référence (Tic).

1) Efficacité énergétique du BÂTI BBIO

Permet de mesurer la capacité d'un bâti à limiter simultanément les besoins en énergie pour :

- le chauffage Bch
- le refroidissement Bfr
- l'éclairage artificiel Becl

indépendamment des systèmes énergétiques de production et de distribution choisis pour assurer les besoins de chauffage, refroidissement, ECS, éclairage artificiel :

$$Bbio = 2 \times Bch + 2 \times Bfr + 5 \times Becl$$

Bbio exprimé en points.

Copyright © 2014 Dunod.

La méthode de calcul **Th_BCE 2012** tient compte des caractéristiques du bâti suivantes :

- Déperditions surfaciques et linéiques des parois opaques.
- Déperditions par les baies.
- Inertie du bâtiment.
- Apports solaires, impact des protections solaires et de leur mode de gestion.
- Scénarios d'occupation et apports internes dus aux occupants et autres apports internes.
- Apports par des dispositifs passifs non séparables du bâti (serres, vérandas…).
- Infiltration d'air par les défauts de perméabilité de l'enveloppe.
- Déperditions par renouvellement d'air.
- Accès à l'éclairage naturel des locaux.

Exigences de résultats : Bbio < Bbiomax

Le **Bbiomax** est modulé en fonction :

- du type de bâtiment (maison individuelle, collectif, bureaux, enseignement…) et de la variation du Bbiomax moyen ;
- de la **catégorie CE1/CE2** : CE1 pas droit à climatiser ; CE2 droit à climatiser) ;
- de la zone géographique : Mbgéo ;
- de l'altitude : Mbalt ;
- de la surface du logement : Mbsurf ;

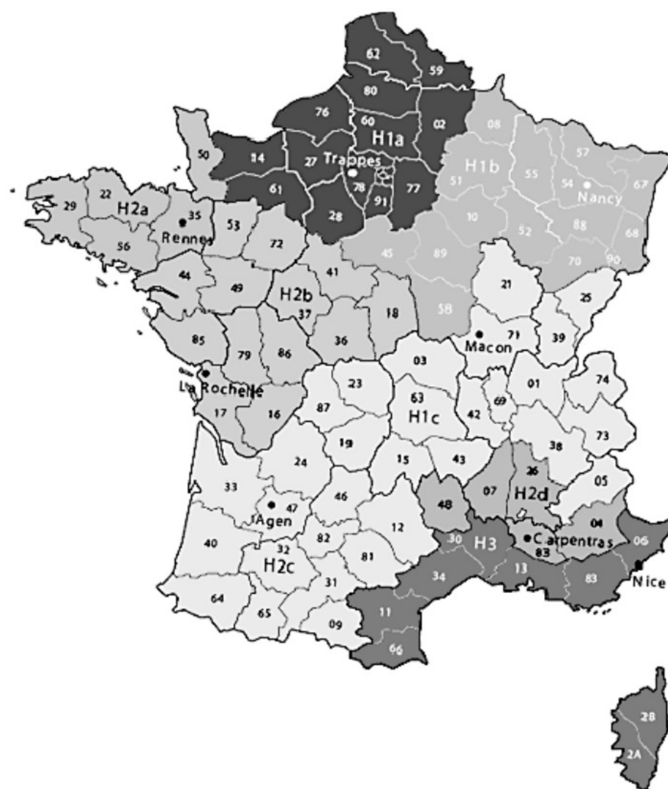
$$Bbiomax = Bbiomax\ moyen \times (Mbgéo + Mbalt + Mbsurf)$$

Valeurs Bbiomax moyen :

Catégorie	CE1	CE2
Maisons individuelles	60	80
Immeubles collectifs d'habitation	60	80
Foyers et cités universitaires	60	90
Bureaux	60	120
Enseignement secondaire/jour	40	50
Enseignement secondaire/nuit	60	90
Enseignement primaire	70	95
Accueil de la petite enfance	90	125

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

Zones climatiques Mbgéo, Mbalt



Zones climatiques	Mbgéo
H1a	1,2
H1b	1,4
H1c	1,2
H2a	1,1
H2b	1,0
H2c	0,9
H2d	0,8
H3	0,7

Altitude	Mbalt
0 à 400 m	0
400 à 800 m	0,2
> 800 m	0,4

Influence de la surface Mb surf

Pour éviter de pénaliser les ménages faisant construire de petits logements, la RT 2012 module ses exigences en fonction de la surface.

SHON RT	Mbsurf
0 à 120 m²	(30 – 0,25 x SHONRT) / Bbiomax moyen
121 à 140 m²	0
141 à 200 m²	(70/3 – SHONRT/6) / Bbiomax moyen
200 m² et plus	-10 / Bbiomax moyen

2) Consommation conventionnelle : CEP

Elle s'établit à partir de 5 usages :

- chauffage ;
- refroidissement (éventuel) ;
- eau chaude sanitaire ;
- éclairage ;
- auxiliaires moins électricité produite à demeure.

Copyright © 2014 Dunod.

Le Cep est exprimé en kWh d'énergie primaire/m²/an et modulé en fonction :

- du type de bâtiment (maison individuelle, collectif, bureaux, enseignement… : **Mctype ;**
- de la catégorie (CE1/CE2) : **Mctype ;**
- de la zone géographique : **Mcgéo ;**
- de l'altitude : **Mcalt ;**
- de la surface du logement (uniquement en résidentiel) : **Mcsurf ;**
- des émissions de gaz à effet de serre des énergies utilisées : **McGES**.

Cep max = 50 × Mctype × (Mcgéo + Mcalt + Mcsurf + McGES) – électricité produite

L'électricité produite à demeure est limitée à 12 kWh/m²/an.

Mctype

Catégorie	CE1	CE2
Maisons individuelles	1	1,2
Immeubles collectifs d'habitation	1	1,2
Foyers et cités universitaires	1,8	2,1
Bureaux	1,2	2
Enseignement secondaire/jour	1,1	1,4
Enseignement secondaire/nuit	1,8	2,1
Enseignement primaire	1,9	2,6
Accueil de la petite enfance	1,7	2

Mcgéo

Catégorie	H1a	H1b	H1c	H2a	H2b	H2c	H2d	H3
Maisons individuelles	1,2	1,3	1,2	1,1	1	0,9	0,9	0,8
Immeubles colletifs d'habitation	1,2	1,3	1,2	1,1	1	0,9	0,9	0,8
Bureaux CE1	1,1	1,2	1,1	1,1	1	0,9	0,8	0,8
Bureaux CE2	1	1	1	1	1	1	1,2	1,2

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

McGES

La modulation de la consommation maximale est également fonction des émissions de gaz à effet de serre : Elle permet +30 % en cas de chauffage ou de production d'ECS au bois ou à biomasse, utilisés localement.

Pour les réseaux de chaleur urbains, la valeur du Mcges est définie selon ses émissions de CO_2.

Contenu CO_2 des réseaux de chaleur ou de froid en g/kWh				
	Contenu $CO_2 \leq 50$	$50 \leq$ contenu CO2 ≤ 100	$100 \leq$ contenu $CO_2 \leq 150$	Contenu $CO_2 \geq 150$
M_{cGES}	0,3	0,2	0,1	0

- contenu inférieur ou égal à 50 grammes par kWh – 49 réseaux seraient concernés ;
- contenu compris entre 50 et 100 grammes – 18 réseaux seraient concernés ;
- contenu compris entre 100 et 150 grammes – 27 réseaux seraient concernés.

3) Exigences de moyens :

- recours aux énergies renouvelables en maison individuelle ;
- traitement des ponts thermiques ;
- traitement de l'étanchéité à l'air (test de la porte soufflante) ;
- surface minimale de baies vitrées (1/6 de la surface des murs) ;
- mesure ou estimation des consommations d'énergie par usage ;
- prise en compte de la production locale d'électricité en habitation (Cepmax + 12 kWhEP/m²/an).

Le recours aux énergies renouvelables en maison individuelle peut être atteint par une des solutions suivantes :

- système d'eau chaude sanitaire solaire avec 2 m² de capteurs certifiés orientés sud ;
- raccordement sur un réseau de chaleur alimenté a 50 % minimum par une énergie renouvelable ;
- système d'eau chaude sanitaire thermodynamique avec COP (moyen annuel) > 2 ;
- système de production de chauffage et/ou d'ECS par une chaudière à micro-cogénération avec combustible liquide ou gazeux ;
- démontrer que le Cep comprend *a minima* 5 kWhep/m².an produits par une source ENR.

Copyright © 2014 Dunod.

4) Logiciels et méthodes de calcul

La méthode de calcul **Th_BCE 2012** permet de vérifier les résultats des calculs. Elle permet de rentrer l'ensemble des données bioclimatiques du projet. Elle prend en compte les systèmes les plus courants du marché.

Ces logiciels permettent de renseigner les données du projet et de savoir s'ils respectent la réglementation thermique. Ces logiciels ne sont pas des logiciels d'aide à la conception, mais simplement de vérification.

5) Attestation pour le respect de la RT 2012

Une attestation doit être fournie par le maître d'ouvrage au dépôt de la demande de permis de construire, de la réalisation de l'étude de faisabilité d'approvisionnement en énergies et de la prise en compte de la réglementation thermique (décret du 18 mai 2011).

Le maître d'ouvrage doit fournir une attestation à **l'achèvement des travaux précisant** que le maître d'œuvre a pris en compte la réglementation thermique. L'attestation est réalisée par un contrôleur technique, un diagnostiqueur, un organisme certificateur ou un architecte (décret du 18 mai 2011).

6) Exemples de calcul

	Maison individuelle		Logement collectif
Département	Aisne	Var	Seine-et-Marne
Zone climatique	H1a	H3	H1a
Altitude	< 400 m	< 400 m	< 400 m
Type de bâtiment	M.I	M.I	logement collectif
SHON RT m²	125	125	70 m²/logt
Énergie principale utilisée	Électricité	Électricité	Réseau de chaleur
Réseau de chaleur			Coulommiers
Bbio max moyen	60	60	60
Mbgéo	1,2	0,7	1,2
Mbalt	0	0	0
Mbsurf	-0,17	-0,17	0
Bbiomax (points)	**62**	**32**	**72**
Mctype	1	1	1
Mcgéo	1,2	0,8	1,2

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

	Maison individuelle		Logement collectif
Mcalt	0	0	0
Mcsurf	-0,2	-0,2	0,06
McGES	0	0	0,3
Cep max (kWhep/an.m²)	**50**	**30**	**89,7**

Avec comme source d'énergie principale l'électricité, les exigences ne pourront être respectées qu'avec un système de chauffage thermodynamique ou solaire.

Copyright © 2014 Dunod.

La garantie AQUAPAC









**GARANTIE SUR LA RESSOURCE
EN EAU SOUTERRAINE
A FAIBLE PROFONDEUR
UTILISEE
A DES FINS ENERGETIQUES**

Les nappes d'eau souterraines de faible profondeur recèlent un potentiel énergétique utilisable grâce aux pompes à chaleur.

Cependant, il peut exister une incertitude sur les conditions d'utilisation de la ressource naturelle qui dépend des caractéristiques géologiques locales.

La garantie **AQUAPAC®**, créée par l'**ADEME**, le **BRGM**, et **EDF** prend en charge la couverture financière de ce risque géologique,

<u>Gestion administrative et financière du système de garantie :</u>
SAF-ENVIRONNEMENT
195, Boulevard Saint Germain
75007 PARIS
Tél. : 01 58 50 76 76
Fax : 01 58 50 06 80

Herve.raimbault@caissedesdepots.fr

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

AQUAPAC est une assurance qui couvre les risques **géologiques** liés à la possibilité d'exploitation énergétique d'une ressource aquifère située en général **à moins de 100 m de profondeur**, puis au maintien de ses capacités dans le temps. Cette assurance s'applique en faveur des installations utilisant des pompes à chaleur d'une puissance thermique **supérieure à 30 KW**.
C'est donc une double garantie, dont les deux aspects sont indissociables :

- **La garantie de recherche** couvre le risque d'échec consécutif à la découverte d'une ressource en eau souterraine insuffisante pour le fonctionnement des installations tel qu'il avait été prévu,

- **La garantie de pérennité** couvre le risque de diminution ou de détérioration de la ressource, en cours d'exploitation.

AQUAPAC assure pendant 10 ans les investissements réalisés pour le captage et le transfert de la ressource jusqu'à l'échangeur eau-eau et sa réinjection.

La garantie ne concerne pas les éventuels incidents de chantier, ni les conséquences des défauts de conception, de réalisation ou de maintenance.

Le Maître d'Ouvrage conserve l'entière responsabilité du respect de la réglementation, du choix des bureaux d'études ou entreprises, et de la réalisation de l'opération.

En aucun cas, AQUAPAC n'a pour objet de se substituer aux polices d'assurances dommage-ouvrage ou de responsabilité décennale au titre desquelles les opérateurs doivent normalement être couverts.

BENEFICIAIRES DE LA GARANTIE AQUAPAC

Les Maîtres d'ouvrages ou leurs mandataires (bureaux d'études, entreprises, prestataires de services, exploitants) désireux de se prémunir vis-à-vis des aléas géologiques liés à l'utilisation énergétique de l'eau souterraine à des fins de **chauffage** et/ou de **climatisation** peuvent souscrire la garantie AQUAPAC.

Cette garantie s'applique à tous les secteurs économiques: habitat, tertiaire, industriel ou agricole, qu'il s'agisse de bâtiments neufs ou existants, et quelle que soit la puissance de l'installation thermique.

ATTRIBUTION DE LA GARANTIE

Un Comité composé des représentants de l'ADEME, du BRGM, et d'EDF, assisté de la SAF-Environnement, décide de l'attribution, ou non, de la garantie, après examen d'un dossier que le requérant aura déposé auprès de la Saf-Environnement .

Ce dossier, dont un modèle peut être demandé auprès de la Saf-Environnement doit comprendre :

- **L'identification** de l'opération concernée, sa localisation et ses différents acteurs,

- **Une fiche descriptive** des besoins thermiques, et du mode d'évaluation des besoins en eau,

- **Une étude de faisabilité du projet** comportant une évaluation des contraintes réglementaires et environnementales, les caractéristiques de la ressource, le mode de captage et de réinjection, les essais et mesures hydrogéologiques prévus, la description de l'installation et des ouvrages de sous-sol et de surface,

- **les éléments économiques** comprenant les coûts prévisionnels d'investissement et de fonctionnement : études préalables, forages, tests et analyses, équipements des puits, échangeur, PAC,

- **Le montant des investissements** pour lesquels la garantie est demandée, qui devra être clairement établi.

Si l'avis du Comité AQUAPAC est favorable, un contrat est alors signé entre la SAF et le Maître d'Ouvrage qui verse **en une seule fois, et au moment de la souscription de chaque garantie,** les cotisations et commissions forfaitaires suivantes :

- *Pour la garantie de recherche* :
  - une cotisation égale à **5%** du montant des ouvrages garantis en recherche,

- *Pour la garantie de pérennité :*
  - une cotisation égale à **4%** du montant des ouvrages garantis en pérennité,

FONCTIONNEMENT DE LA GARANTIE

Garantie de recherche

Risques couverts

Le risque couvert est celui de l'échec quant à la découverte du débit d'eau maximal de production fixé dans le contrat de garantie comme suffisant au fonctionnement correct des installations, à partir des éléments techniques fournis.
Le risque couvert est aussi celui de l'échec quant à la possibilité de réinjection du débit.

Montant garanti en recherche

Le montant garanti en recherche, fixé dans le contrat, est égal au coût réel des études préalables, forages, tests et analyses, équipements des puits, désignés dans la demande de recherche, (plafonné au montant prévisionnel), déduction faite des subventions reçues.

Lorsque plusieurs forages sont prévus, le contrat est établi pour le premier, et étendu par avenant au suivant après chaque constat de succès.

Copyright © 2014 Dunod.

Fonctionnement de la garantie

La garantie prend effet dès la signature du contrat et le versement des primes de la garantie de recherche.
Le Maître d'Ouvrage peut alors faire réaliser les travaux de forage.
Il doit informer la Saf-Environnement de la date des essais et de la date de réception des ouvrages.
La capacité des ouvrages est mesurée à la fin des travaux, et le rapport de fin de forage avec les résultats des essais hydrogéologiques doit être envoyé à la Saf-Environnement

Evaluation du résultat du forage

Suivant la valeur du débit mesuré au cours des essais, il y aura succès, échec partiel ou échec total :

- *Succès* : le débit trouvé est supérieur ou égal au débit contractuel ;

- *Echec total* : le débit trouvé est inférieur à la moitié du débit contractuel ;

- *Echec partiel* : le débit trouvé est compris entre ces deux valeurs.

En cas de succès le demandeur reçoit alors l'appel de cotisation pour la garantie de pérennité, qui est accordée pour dix ans à partir de la date de réception du paiement de la cotisation correspondante.

Calcul de l' indemnité « recherche »

En cas d'échec total, le Comité AQUAPAC déclenche le versement de l'indemnité, égale au montant garanti.

En cas d'échec partiel, le Maître d'ouvrage peut néanmoins exploiter la ressource en son état et bénéficier alors de la garantie de pérennité :
- la nouvelle valeur du débit exploitable est définie par un avenant au contrat de garantie ;
- le montant de l'indemnité est alors proportionnel au déficit en eau sur le débit garanti initial

Garantie de pérennité

Risques couverts :

Sous réserve d'un entretien correct des ouvrages et des équipements d'exploitation, attesté par un carnet de maintenance ou des factures de prestations de services, la garantie de pérennité couvre les risques suivants :

a) *diminution des débits d'exhaure ou de réinjection* au-dessous de la valeur garantie :

- sinistre partiel : le débit diminue et atteint une valeur comprise entre la valeur garantie et la moitié de cette valeur.

- sinistre total : le débit atteint une valeur inférieure à la moitié du débit de garantie

b) dommages aux matériels de puisage et de réinjection et/ou aux équipements du circuit primaire, y compris l'échangeur, occasionnés par des changements survenus dans les caractéristiques de la ressource dus à des causes naturelles ou de voisinage.

Durée de la Garantie

La garantie est accordée pour une période de **10 ans** à partir de la date effective de mise en service.
Elle peut être différée en cas de forage d'essai. Si ce délai dépasse 6 mois, un nouvel essai de pompage devra être effectué.

Montant garanti en pérennité

Le montant garanti, fixé par contrat, est égal au coût de l'ensemble des ouvrages primaires neufs : forages, pompes, matériels de surface, y compris l'échangeur eau-eau. Ces coûts s'entendent toutes subventions déduites.

Pour tenir compte de l'amortissement de l'installation, ce montant garanti diminue de 5 % par semestre écoulé.

En cas d'échec total, le coût prévisionnel des travaux nécessaires à la restauration fonctionnelle de l'installation, peut être également garanti.

Calcul de l'indemnité « pérennité »

L'assiette **A** de l'indemnisation est calculée ainsi :
a) Diminution des débits d'exhaure ou de réinjection :
- en cas de sinistre partiel, **A** = la fraction du montant garanti proportionnelle au déficit en eau,
- en cas de sinistre total, **A** = montant garanti

b) Dommages :
- en cas de poursuite de l'exploitation, **A** = coût réel des travaux de remise en état, plafonné au montant garanti,
- en cas d'abandon de l'exploitation, **A** = montant garanti.

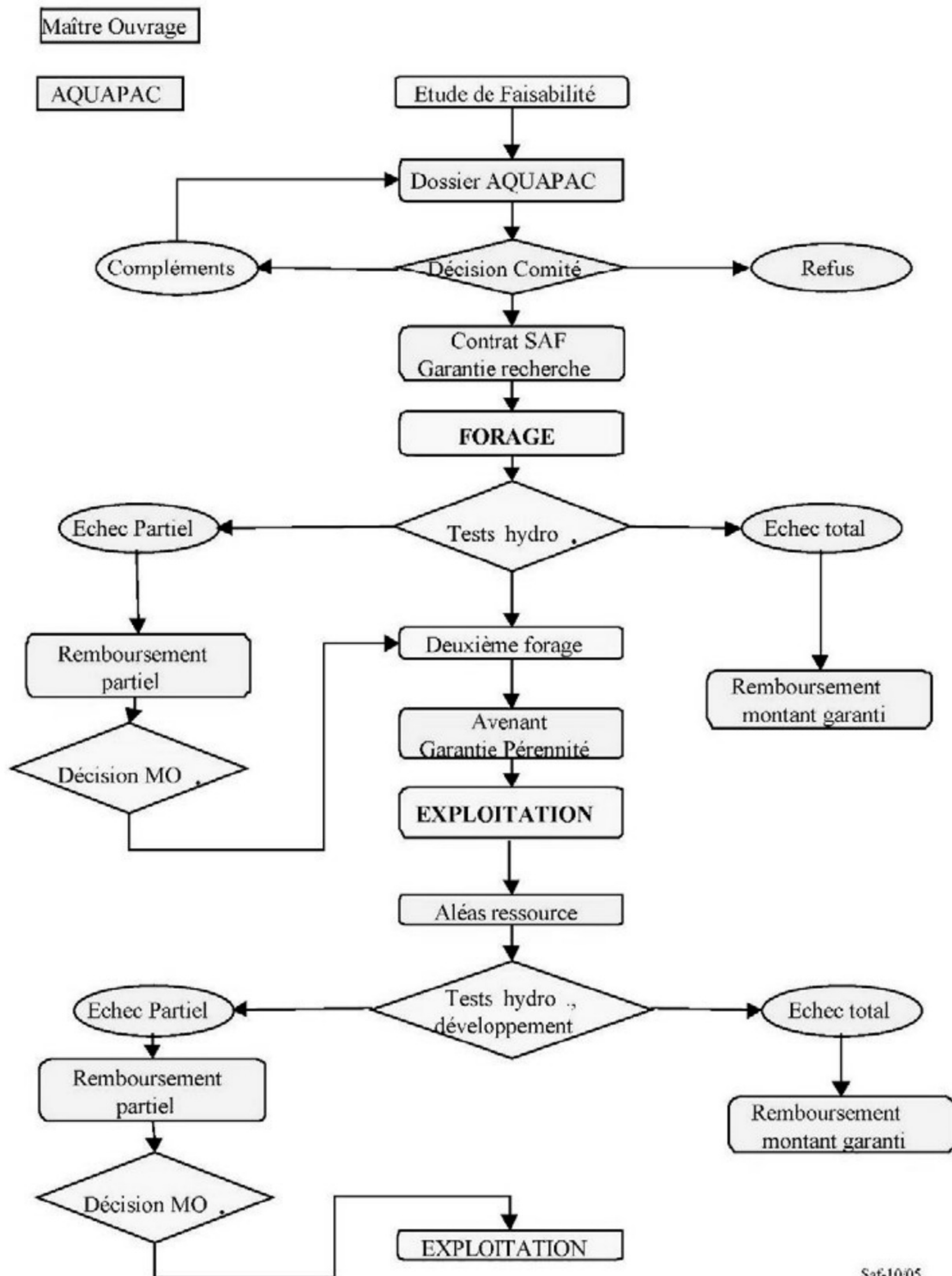
Fonctionnement de la garantie

En cas de constat de modification des caractéristiques de la ressource de nature à perturber l'exploitation, le maître d'ouvrage ou l'exploitant adresse une déclaration de sinistre à la Saf-Environnement.
Des essais hydrogéologiques peuvent alors être réalisés par le maître d'ouvrage, en accord avec le Comité qui pourra mandater un expert.
Ensuite, le Comité apprécie la recevabilité du sinistre et déclenche, s'il y a lieu, le paiement des indemnités.
Le Comité se réserve toutefois la possibilité en lieu d'indemnisation de restaurer le forage ou l'installation

PLAFOND

Les indemnisations sont plafonnées à **115 000 Euros** par sinistre.

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.



Copyright © 2014 Dunod.

Certifications

Marque NF PAC

La marque « NF PAC » est une marque volontaire, délivrée par l'AFAQ-AFNOR Certification, permettant de vérifier la conformité des pompes à chaleur aux différentes normes en vigueur, françaises, européennes et internationales ainsi que le respect des performances minimales fixées par les membres du Comité particulier de la marque NF-PAC au travers du Référentiel.

Elle couvre les différentes pompes à chaleur aérothermiques et géothermiques de puissance calorifique inférieure ou égale à 50 kW. Pour ces différents produits, elle certifie les paramètres suivants :

- les coefficients de performance (COP) avec un seuil minimum pour différents points de fonctionnement ;
- la puissance thermique ;
- le niveau de puissance acoustique.

Pour délivrer la marque NF PAC, l'AFAQ-AFNOR Certification fait procéder (lors de la demande puis régulièrement) à des essais sur différents produits de la gamme et à un audit des unités de fabrication afin de contrôler la mise en place par le fabricant d'un ensemble de dispositions permettant de maîtriser la conformité aux normes et aux spécifications complémentaires du référentiel. L'efficacité des moyens mis en œuvre par le fabricant est évaluée à partir des exigences applicables de la norme NF EN ISO 9001.

À la date de rédaction de cet ouvrage : selon l'AFPAC, 1 566 modèles de 82 marques bénéficient de la certification NF PAC. La liste peut être consultée sur le site Internet : www.certita.org

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

Appellation Qualité « QUALIPAC »

Qualipac est une appellation de confiance créée par l'AFPAC en 2007 avec le soutien de l'ADEME et d'EDF. Elle a pour but de faciliter la mise en relation des particuliers intéressés par un chauffage performant et respectueux de l'environnement avec des installateurs spécialistes de la pompe à chaleur et soucieux de la satisfaction de leurs clients. Depuis le 1er janvier 2010, la gestion de Qualipac est assurée par Qualit'ENR.

Qualit'ENR est une association pour la qualité d'installation des systèmes à énergies renouvelables. Cette association a été fondée par 5 entités professionnelles (APEB, Enerplan, UCF-FFB, UNCP-FFB, SER).

Le droit d'utilisation exclusif de l'appellation Qualipac est accordé aux entreprises d'installations de pompes à chaleur suivant les critères fixés dans le règlement d'usage de la marque, le référentiel Qualipac. L'entreprise d'installations de PAC adhérente à la marque s'engage à respecter le référentiel Qualipac, ses critères et sa charte qualité PAC.

La liste des entreprises par communes est disponible sur le site www.qualit-enr.org

QUALIFORAGE

Démarche qualité pour les foreurs de sondes géothermiques verticales

L'objectif de cette démarche est de fournir aux entreprises de forage de sondes géothermiques un standard de qualité.

Les entreprises s'engagent sur les points suivants :

- réaliser les ouvrages selon les règles de l'art ;
- souscrire une garantie décennale (avec mention sonde géothermique) ;
- participer a une journée technique d'information (BRGM) ;
- déclarer les forages à la DRIRE (obligation réglementaire) ;
- renouveler annuellement l'adhésion à Qualiforage ;

Copyright © 2014 Dunod.

- remettre au client une facture descriptive détaillée et complète de la prestation, qui distingue a minima le poste « fourniture d'équipements », le poste « main d'œuvre » ;
- assurer auprès du client un rôle de conseil.

La liste des foreurs inscrits dans la démarche engagement qualité pour la réalisation de sondes géothermiques est disponible sur le site www.geothermie-perspectives.fr

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

Copyright © 2014 Dunod.

Principes légaux

Textes et documents de référence

Décret n° 2007- 737 du 7 mai 2007 relatif à certains fluides frigorigènes utilisés dans les équipements frigorifiques et climatiques.

Décret N° 210-349 du 31 mars 2010 relatif à l'inspection des systèmes de climatisation et des pompes à chaleur réversibles prévoit une inspection obligatoire des systèmes de climatisation et des pompes à chaleur réversibles d'une puissance frigorifique nominale supérieure à 12 kW, et ce à compter d'avril 2013

Décret n° 2011-396 du 13 avril 2011 relatif aux substances appauvrissant la couche d'ozone et aux fluides fluorés participant à l'effet de serre.

Décret n° 2011-396 du 13 avril 2011 relatif à des substances appauvrissant la couche d'ozone et à certains gaz à effet de serre fluorés, aux biocides et au contrôle des produits chimiques.

Arrêté du 13 mai 2011 abrogeant et remplaçant l'arrêté du 29 juillet 2009 relatif à l'agrément de la demande de titre V relative à la prise en compte des appareils électriques individuels de production d'eau chaude sanitaire thermodynamique dans la réglementation thermique 2005.

Normes

Norme NF EN 14511. La norme spécifie les conditions d'essai pour la détermination des caractéristiques de performances des pompes à chaleur air/air, eau/air, air/eau et eau/eau, avec compresseur entraîné par un moteur électrique lorsqu'ils sont utilisés pour le chauffage des locaux.

Norme NF EN 13313. Concerne la compétence des personnels relative à la mise en œuvre des systèmes de réfrigération et pompes à chaleur.

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.
Copyright © 2014 Dunod.

Normes NF EN 378-1 à 4. Concerne les exigences de sécurité et d'environnement relatives à la conception, la construction, les essais, le marquage, la documentation, l'installation, le fonctionnement, la maintenance, la réparation et la récupération… des systèmes de réfrigération et pompes à chaleur

Norme NF X10-970. Relative à la réalisation, mise en œuvre, entretien, abandon des forages d'eau et de géothermie ainsi que des sondes géothermiques avec liquide caloporteur en circuit fermé.

Norme NF X-999. Relative aux forages captant des aquifères, ouvrages de réinjection, sondes géothermiques verticales. Elle contient les préconisations techniques de la conception à l'abandon des forages.

Copyright © 2014 Dunod.

Index

Copyright © 2014 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

G

M

P

Q

R

S

T

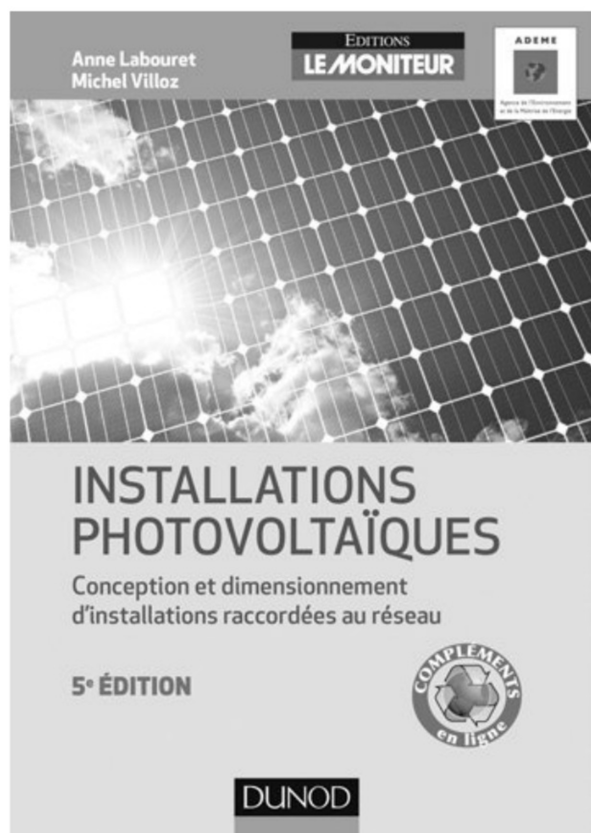
V

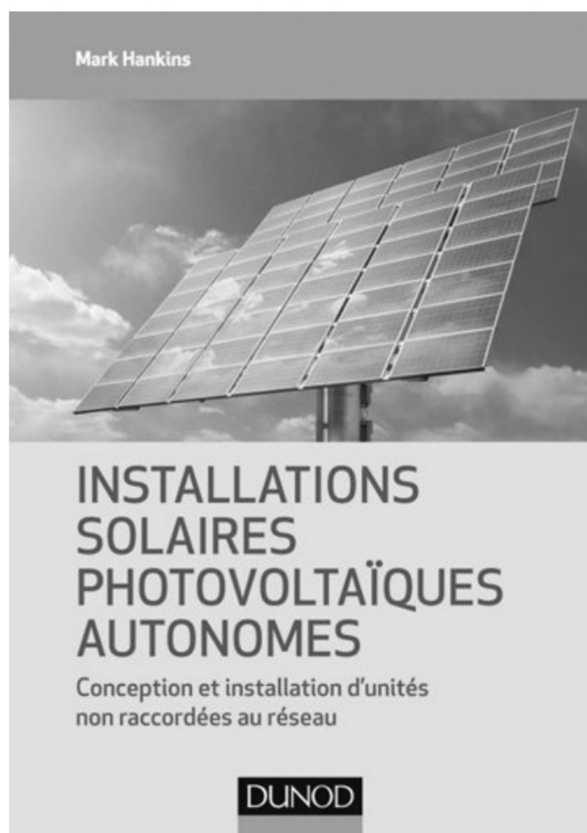
Copyright © 2014 Dunod.

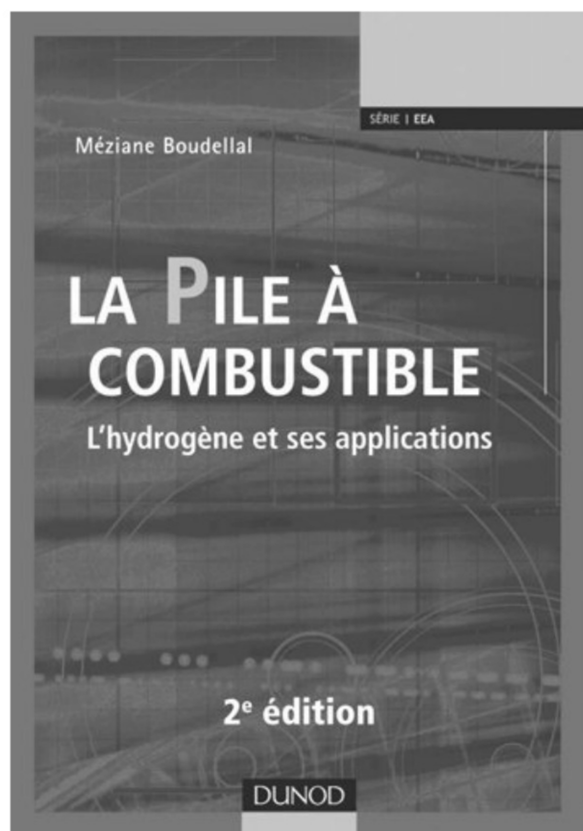
Copyright © 2014 Dunod.

Copyright © 2014 Dunod.

RETROUVEZ ÉGALEMENT :







Copyright © 2014 Dunod.

Copyright © 2014 Dunod.

Copyright © 2014 Dunod.